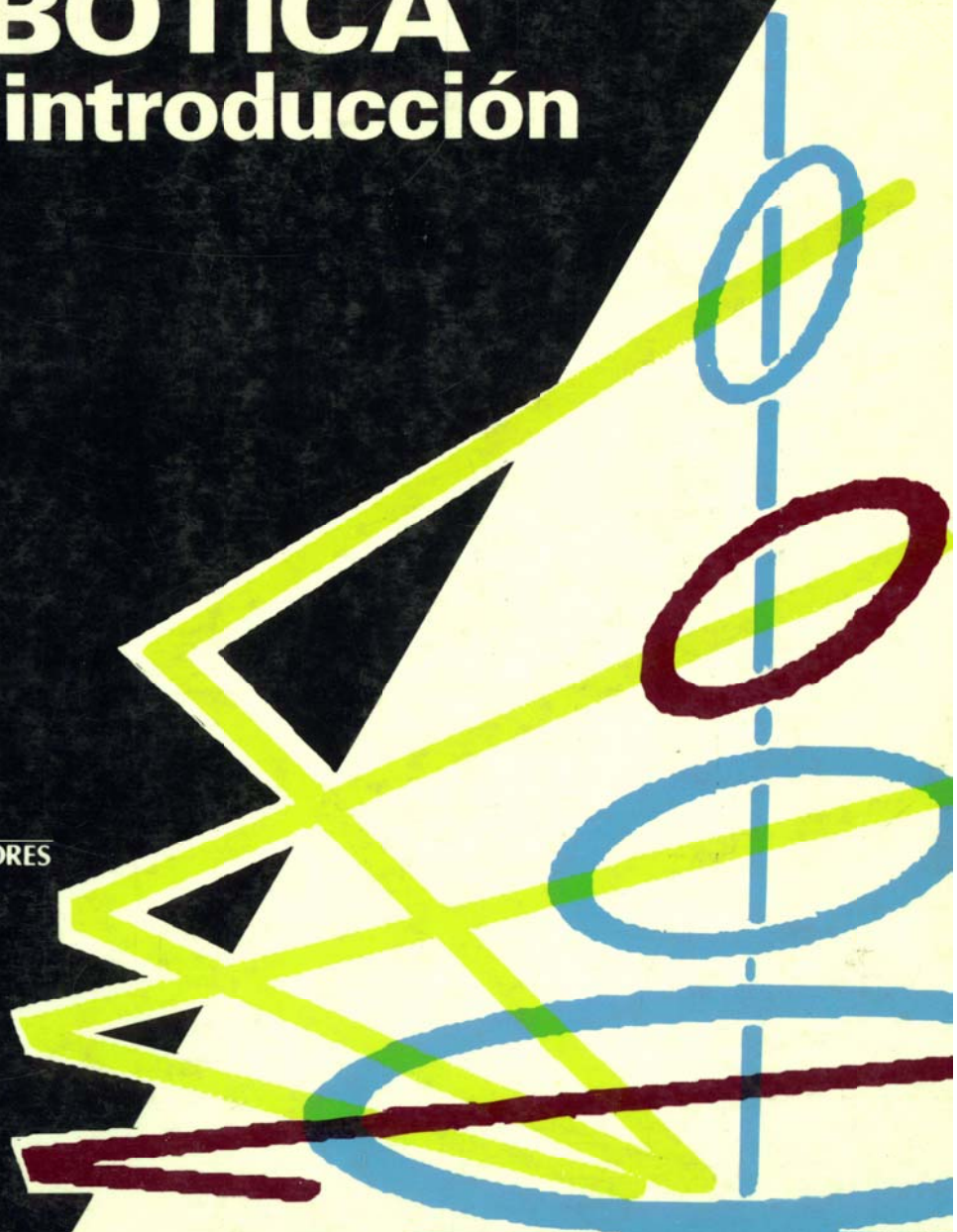


**McCLOY**

**ROBÓTICA**  
**Una introducción**

 **LIMUSA**  
**NORIEGA EDITORES**





## ROBÓTICA, una introducción





# ROBÓTICA, una introducción

D. McCloy  
D. M. J. Harris

Versión en español:  
ANDRÉS EDUARDO CHEHADE DURÁN

Revisión técnica:  
JUAN MANUEL IBARRA ZANNATHA  
Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica  
Instituto Politécnico Nacional  
Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica  
CINVESTAV-IPN  
Doctor en Ingeniería especializado en Robótica  
IRISA, Francia



LIMUSA



**GRUPO NORIEGA EDITORES**

México • España • Venezuela • Argentina  
Colombia • Puerto Rico

Versión autorizada en español de la obra publicada  
en inglés por Open University Press, con el título  
**ROBOTICS: AN INTRODUCTION.**  
© MCMLXXXVI, por Don McCloy y Michael Harris  
ISBN 0-335-15402-6

*Elaboración: Laserprint*

*La presentación y disposición en conjunto de*

**ROBÓTICA, UNA INTRODUCCIÓN**

*son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra  
puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema  
o método, electrónico o mecánico (INCLUYENDO EL FOTOCOPIADO,  
la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento  
de información), sin consentimiento por escrito del editor.*

Derechos reservados:

© 1993, EDITORIAL LIMUSA, S.A. de C.V.  
GRUPO NORIEGA EDITORES  
Balderas 95, C.P. 06040, México, D.F.  
Teléfono 521-50-98  
Fax 512-29-03

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria  
Editorial Mexicana. Registro número 121.

**Primera edición: 1993**

*Impreso en México*  
(7847)

**ISBN 968-18-4439-4**

—000—

ESTA OBRA SE TERMINO DE IMPRIMIR EL DIA 5 DE MARZO DE 1993  
EN LOS TALLERES DE GRUPO IMPRESA  
LAGO CHALCO 230, COL. ANÁHUAC  
MÉXICO, D.F.

LA EDICIÓN CONSTA DE 3 000 EJEMPLARES  
Y SOBRANTES PARA REPOSICIÓN

5C 8

# Contenido

---

<i>Introducción</i>	11
<i>Lista de abreviaturas y acrónimos</i>	15
<b>Capítulo 1 De las herramientas de pedernal a la manufactura flexible</b>	<b>17</b>
1.1 Introducción	17
1.2 La tecnología amplía el potencial humano	18
1.3 Mecanización	20
1.4 Control automático	22
1.5 Automatización	28
1.6 Robótica	29
1.7 Los elementos de un robot industrial	31
1.8 El porqué de los robots	35
1.9 Operaciones con robots	37
1.10 Resumen	48
<b>Capítulo 2 Mecanismos y configuraciones para robots</b>	<b>49</b>
2.1 Introducción	49
2.2 Mecanismos	49

2.3	Cadenas simples: $M = 3$	64
2.4	Forma geométrica de las cadenas simples	68
2.5	Métodos matriciales	72
2.6	Resumen	85
<b>Capítulo 3</b>	<b>Muñecas, manos, patas y pies</b>	<b>87</b>
3.1	Introducción	87
3.2	Muñecas	87
3.3	Tenazas	89
3.4	Robots móviles	97
3.5	Métodos de soporte: ruedas y rieles	97
3.6	Máquinas caminantes	100
3.7	Energía consumida durante el desplazamiento	108
3.8	Problemas de control	112
3.9	Resumen	113
<b>Capítulo 4</b>	<b>Sistemas de accionamiento</b>	<b>115</b>
4.1	Introducción	115
4.2	Conversión de potencia hidráulica a potencia mecánica	120
4.3	Válvulas de control de encendido-apagado	123
4.4	Servoválvulas	124
4.5	Un modelo matemático	126
4.6	Servomecanismos hidráulicos	127
4.7	Sistemas eléctricos	128
4.8	Transmisión mecánica	135
4.9	Resumen	141
<b>Capítulo 5</b>	<b>Modelado y control</b>	<b>143</b>
5.1	Introducción	143
5.2	Control de la secuencia	144
5.3	Modelo dinámico de un robot	150
5.4	Control geométrico y cinemático de la trayectoria	153
5.5	Control continuo	159

<i>Contenido</i>	<i>7</i>
5.6 Control digital	173
5.7 Sistemas de control en robots	175
5.8 Resumen	179
<b>Capítulo 6 Componentes de la retroalimentación</b>	<b>181</b>
6.1 Introducción	181
6.2 Detección y medición de la posición	183
6.3 Medición de la velocidad	193
6.4 Medición de la fuerza	194
6.5 Conversión analógica a digital	200
6.6 Otros problemas de interfase	208
6.7 Resumen	209
<b>Capítulo 7 Control por computadora</b>	<b>211</b>
7.1 Introducción	211
7.2 Operación automática	213
7.3 Enseñanza	224
7.4 <i>Software</i>	229
7.5 Equipo para control por computadora	233
7.6 Resumen	241
<b>Capítulo 8 Sensores externos e inteligencia</b>	<b>243</b>
8.1 Introducción	243
8.2 Tacto y detección táctil	244
8.3 Medición de fuerzas y pares totales	249
8.4 Detección de proximidad usando sensores sin contacto	253
8.5 Determinación de rangos	259
8.6 Visión artificial	262
8.7 Inteligencia artificial	272
8.8 Resumen	276
<b>Capítulo 9 Aplicaciones de los robots</b>	<b>277</b>
9.1 Introducción	277
9.2 Soldadura por puntos	277

9.3	Moldeo por inyección	282
9.4	Soldadura por arco	284
9.5	Revestimiento de superficies	291
9.6	Servicio a máquinas herramienta	293
9.7	Ensamble	295
9.8	Empaque y acomodo	297
9.9	Operaciones con prensas	298
9.10	Fundición por inyección	300
9.11	Inspección	301
9.12	Resumen	302
<b>Capítulo 10</b>	<b>Teleoperadores</b>	<b>303</b>
10.1	Introducción	303
10.2	Control de la velocidad contra control de la posición	306
10.3	Control unilateral y bilateral	309
10.4	Dificultades analíticas	315
10.5	Dispositivos de entrada para control	316
10.6	Dispositivos para control de entrada para minusválidos	320
10.7	Aplicaciones de los teleoperadores	323
10.8	Teleoperadores para minusválidos	327
10.9	Expansión a través de una computadora	332
10.10	Resumen	333
<b>Capítulo 11</b>	<b>Factores económicos y financieros</b>	<b>335</b>
11.1	Introducción	335
11.2	Población de robots	335
11.3	La industria de los robots	340
11.4	Justificación financiera de la robótica	342
11.5	Resumen	350
<b>Capítulo 12</b>	<b>Factores sociales de seguridad</b>	<b>351</b>
12.1	Introducción	351
12.2	Aspectos de seguridad	351

<i>Contenido</i>	9
12.3 Efectos sobre las fuentes de empleo	356
12.4 Resumen	360
<b>Apéndice 1 Análisis de Lagrange de un robot con tres grados de libertad</b>	<b>361</b>
<b>Apéndice 2 Análisis del robot de eslabones paralelos</b>	<b>363</b>
<i>Bibliografía</i>	367
<i>Índice</i>	379





## Introducción

---

Los robots industriales han atravesado por infinidad de cambios desde la aparición de la primera máquina *Unimation* en 1962. Sus aplicaciones son cada vez más numerosas y extensas. Las ventajas que ofrecen los robots, como son mayor flexibilidad, la capacidad para reprogramarlos, el trabajo sin fatiga y su resistencia, son cada vez más apreciadas por los industriales e, incluso, el hombre ordinario se ha dado cuenta de que los robots industriales de la actualidad, a diferencia del maravilloso hombre de hoja de lata presente en los relatos de ciencia ficción, tienen un papel real y útil que desempeñar.

Sin embargo, a pesar de los muchos y variados avances en las tecnologías relacionadas, el robot industrial aún no ha logrado dar todo su potencial. Todavía está en gestación una segunda generación de robots, capaces de sentir y reaccionar ante el ambiente externo. Los robots han sido y siguen siendo creados a imagen y semejanza del ser humano y esta segunda generación de robots parece seguir avanzando en esta dirección. Pero el antropomorfismo no deja de ser sino una influencia limitante, lo que plantea la necesidad de buscar nuevas perspectivas. Es posible que debamos tratar de ver más allá del principio de la substitución de un ser humano por un robot parecido a él. Ha llegado el momento de ver bajo una nueva luz los procesos de manufactura, en particular el ensamblaje, sin perder de vista el diseño de productos de acuerdo con las limitaciones del proceso. Los sistemas de manufactura flexible, que incorporan robots compactos con gran cantidad de brazos y capacidades de segunda generación interactuando con máquinas herramienta, todo bajo el control de una computadora, ofrecen un potencial ilimitado. Además, conforme las capacidades de los robots vayan evolucionando para enfrentar los problemas

que impondrán tareas industriales más difíciles y complicadas, será cada vez más factible que se usen fuera de las fábricas dando credibilidad a las actuales investigaciones sobre robots móviles capaces de operar en ambientes no estructurados, como casas y hospitales.

La robótica es una actividad multidisciplinaria: es un vehículo ideal para ilustrar un enfoque sistemático y, como tal, ofrece un medio extremadamente útil para ampliar las perspectivas de un estudiante. Es debido a lo anterior que consideramos poco conveniente e impráctico adoptar un enfoque demasiado rígido para estudiar el tema, limitado por definiciones convencionales. Las tecnologías de dispositivos de selección y colocación, máquinas caminantes, teleoperadores y prótesis mecánicas, tan estrechamente vinculadas con el tema de la robótica, no pueden pasarse por alto.

Tanto el ingeniero y el administrador en la industria como el estudiante de ingeniería requieren contar con información completa y detallada sobre el diseño y la aplicación de todos los elementos que intervienen en un proceso de manufactura automatizada. El objetivo de este libro es satisfacer esta necesidad en el área de los robots industriales. Como en el caso de la mayoría de los equipos controlados por computadora, siempre será posible manejar un robot aun cuando no se cuente con suficientes conocimientos de las tecnologías de sus subsistemas. Para ello, será necesario que el operador esté familiarizado con los procedimientos de enseñanza y comunicación aplicables a cada máquina en particular, información que puede adquirir en manuales de instrucción y cursos de capacitación. Pero seleccionar el mejor robot para una tarea en particular y hacer que resulte adecuado para la realización de dicha tarea, son actividades que requieren mucho más que simples procedimientos. Será necesario contar con una visión a fondo de las capacidades de la gran variedad de máquinas disponibles; esto, a su vez, requiere un claro entendimiento de las distintas tecnologías que contribuyen a la creación de un sistema formado por robots industriales.

El contenido de este libro es resultado lógico de las influencias que hemos mencionado antes. En el capítulo 1 se establece el escenario para el estudio al definir los temas de interés y analizar su importancia dentro del campo más extenso de la automatización. En el capítulo 2 se muestra cómo esta teoría de los mecanismos se relaciona con los robots y se analizan distintas configuraciones de manipuladores, particularmente en relación con el aspecto matemático de los eslabones. En el capítulo 3 se estudian las muñecas y efectores finales para la realización de actividades por los robots, así como la tecnología de las máquinas caminantes. Las áreas fundamentales de activación, control, medición y computadoras se cubren en los capítulos 4, 5, 6 y 7. En el capítulo 8 se analiza la interacción del robot con su ambiente; el análisis del tema de la visión artificial conduce a los temas afines del reconocimiento de patrones y

configuraciones y del papel de la inteligencia artificial. Algunas de las aplicaciones industriales más comunes de los robots se detallan en el capítulo 9. En el capítulo 10 se consideran los diversos usos de los teleoperadores y de otros dispositivos relacionados. Por último, en los capítulos 11 y 12 se presenta un análisis de los aspectos financieros de los robots y se consideran algunas de las consecuencias sociales de la aplicación de esta tecnología.

Dado que este libro se fundamenta en una gran variedad de tecnologías distintas, consideramos que puede ser de mayor utilidad en programas de estudios para el último año de licenciatura o como parte de un programa de posgrado. Los lectores que ya se desenvuelven en la industria también podrán beneficiarse del contenido de este libro, no sólo al adquirir un conocimiento más a fondo de la tecnología particular, sino, igualmente importante, al entender y apreciar sus aplicaciones, costos y beneficios.

Para la creación de este libro hemos recurrido en gran medida a nuestras experiencias durante la enseñanza del tema a estudiantes e industriales en la Universidad de Ulster. No fue fácil escribir este libro, pero tuvimos la fortuna de contar con la gran ayuda de Estelle Goyer, quien se hizo cargo de la mecanografía (y nos hizo ver nuestros errores de ortografía) y de Reg McClure cuyos esfuerzos artísticos contribuyeron a mejorar en gran medida la presentación de esta obra.

*Don McCloy*  
*Michael Harris*



## *Lista de abreviaturas y acrónimos*

---

A/D	analogue-to-digital (conversion)	analógica a digital (conversión)
AC	alternating current	corriente alterna
ADC	analogue-to-digital converter	convertidor analógico a digital
AGV	automatic guided vehicle	vehículo guiado automáticamente
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	Código Estándar Americano para Intercambio de Información
ASR	automatic speech recognition	reconocimiento automático de la voz
AVR	automatic voltage regulator	regulador automático de potencial
BASIC	a high-level computer language: Beginners' All-purpose Symbolic Code	un lenguaje de computación de alto nivel: <i>Beginners' All-purpose Symbolic Code</i>
CAD	computer-aided design	diseño con ayuda de la computadora
CAM	computer-aided manufacture	manufactura con ayuda de la computadora
CID	control input device	dispositivo para control de entrada
CMOS	complementary MOS	MOS (silicón de óxido metálico) complementario
CNC	computerized numerical control	control numérico computarizado
CP	continuous-path (control)	trayectoria continua (control de)
CPU	central processing unit	unidad central de procesamiento
CRT	cathode-ray tube	tubo de rayos catódicos
D/A	digital-to-analogue (conversion)	digital a analógica (conversión)
DAC	digital-to-analogue converter	convertidor digital a analógico
DC	direct current	corriente continua
DIL	dual-in-line (switches)	dual en línea (interruptores)
DNC	direct numerical control	control numérico directo
EAROM	electrically alterable read-only memory	memoria de datos fijos alterable por medios eléctricos
ECL	emitter coupled logic	lógica acoplada al emisor

EPROM	erasable programmable read-only memory	memoria programable y borrrable de sólo lectura
FFTO	free-flying teleoperator	teleoperador de vuelo libre
FMS	flexible manufacturing system	sistema de manufactura flexible
FORTRAN	A high-level computer language	un lenguaje de computación de alto nivel
I/O	input/output	entrada/salida
IIL	integrated injection logic	lógica de inyección integrada
IWR	isolated word recognition system	sistema de reconocimiento de palabras aisladas
LCD	liquid crystal display	pantalla de cristal líquido
LED	light-emitting diode	diodo emisor de luz
LIDAR	light detection and ranging	detección y telemetría de luz
LSB	least significant bit	bit menos significativo
LSI	large-scale integration	integración a gran escala
LVDT	linear variable differential transformer	transformador diferencial de variable lineal
MIG	inert gas-metal-arc	soldadura por arco con electrodo metálico y gas inerte
MOS	metal oxide silicon	silicón de óxido metálico
MPU	microprocessor unit	unidad de microprocesamiento (microprocesador)
MSB	most significant bit	bit más significativo
NC	numerical control	control numérico
PID	proportional integral derivative	integral derivativo proporcional
PLC	programmable logic controller	controlador lógico programable
PROM	programmable read-only memory	memoria programable de sólo lectura
PTP	point-to-point (control)	punto a punto (control)
RAM	random access memory	memoria de acceso aleatorio
RCC	remote centre compliance	docilidad con centro remoto
RMRC	resolved motion rate control	control de rapidez de movimiento resuelto
ROM	read-only memory	memoria de datos fijos
RVDT	rotary variable differential transformer	transformador diferencial de variable de rotación
SATO	shuttle-attached teleoperator	teleoperador acoplado a un dispositivo de enlace
TCP	tool center point	centro de la herramienta
TIG	inert gas-tungsten-arc	soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas inerte
TTL	transistor-transistor logic	lógica transistor a transistor
VAL	a high-level language developed by Unimation for their robots	un lenguaje de alto nivel creado por <i>Unimation</i> para sus robots
VDU	visual display unit	unidad de exhibición de video
VLSI	very large scale integration	integración a escala muy grande

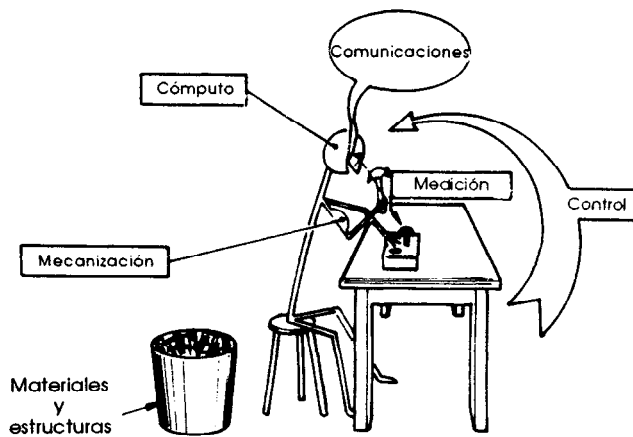
# Capítulo 1

## *De las herramientas de pedernal a la manufactura flexible*

---

### **1.1 Introducción**

La tecnología es tan antigua como el hombre mismo. Los hombres se convirtieron en tecnólogos cuando aprendieron a aprovechar los materiales y fenómenos naturales del mundo físico que los rodeaba. Cuando descubrieron que un hueso o garrote podía usarse para matar animales y mover rocas, se convirtieron en fabricantes de herramientas, y el uso de herramientas es la marca distintiva del tecnólogo. Las herramientas, desde los garrotes hasta los teleoperadores, han permitido a la raza humana adquirir una posición de preeminencia en el reino animal. Thomas Carlyle ha descrito esta situación en forma por demás elegante: “El hombre está parado en un pedestal, cuya alzada apenas destaca sobre el nivel del suelo y no mide más de medio metro cuadrado de completa inseguridad. Una tonelada es una carga que sin duda lo aplastaría; cualquier animal del campo lo despedazaría como si fuera un pedazo de trapo viejo. Sin embargo, el hombre puede usar herramientas. Sin herramientas el hombre es nada. Con ellas lo es todo”. Las herramientas han aumentado la capacidad humana pero además han establecido otra diferencia importante entre nosotros y los animales -el concepto de la planificación. Cuando un hombre fabrica una herramienta es porque tiene en mente un uso para ella: la planificación y la resolución de problemas forman el núcleo de la tecnología.



**Figura 1.1** La tecnología amplía el potencial humano.

## 1.2 La tecnología amplía el potencial humano

Este proceso de resolución de problemas y de aplicación de los conocimientos adquiridos ha redundado, como parte de un desarrollo evolutivo, en una gran variedad de tecnologías, cada una de las cuales amplía el potencial humano de una manera particular (McCloy 1984) (figura 1.1). Las máquinas y la mecanización, han incrementado la fuerza muscular; la computadora ha aumentado el poder mental; los sentidos del hombre se han ampliado por medio de instrumentos y dispositivos de medición; a nuestra capacidad de control la ha mejorado la cibernética; la velocidad y el alcance de nuestros medios de comunicación se han incrementado enormemente con las telecomunicaciones; es ilimitado el acervo de materiales y estructuras disponibles para la fabricación de artefactos, incluyendo los de cerámica, las fibras de carbono y los materiales compuestos.

Hemos llegado a una era emocionante y dramática en la cual la tecnología, especialmente la de los robots, no sólo incrementará nuestras capacidades humanas sino que bien podría reemplazarlas por completo. Pero antes de seguir adelante con este tema será de gran utilidad analizar estas capacidades en mayor detalle.

La frase de Carlyle destaca nuestras limitaciones físicas frente a otros animales. Uno de los hombres más fuertes del mundo, Paul Anderson, campeón olímpico de levantamiento de pesas, podía levantar un peso de aproximadamente 25 kN, lo cual es equivalente a 38 personas. Pero este peso es minúsculo si se compara con el desplazado en muchas de las actividades industriales de la actualidad. ¿Y qué decir de la potencia? Al-



gunos experimentos han demostrado que durante intervalos de menos de 1 segundo un hombre extraordinariamente dotado puede generar aproximadamente 1 kW, pero conforme aumenta la duración del periodo de trabajo, la potencia generada disminuye a 200 W en 10 segundos y a menos de 100 W en periodos más prolongados. Esto también es risible si se compara con la potencia generada por el automóvil promedio, que alcanza 50 kW.

Los sentidos del hombre también tienen limitaciones. El oído está restringido al intervalo de frecuencia de 20 a 20 000 Hz y las amplitudes de presión mayores de  $200 \text{ N/m}^2$  (un quingentésimo de una atmósfera) pueden provocar sordera. La vista, también, tiene grandes limitaciones. El espectro de radiación electromagnética se extiende desde longitudes de onda de aproximadamente 0.001 nm (rayos gama) hasta alrededor de 100 km (onda larga de radio), pero dentro de este amplísimo espectro, el ojo humano está restringido a captar la estrecha banda que abarca de los 390 nm (luz violeta) a los 750 nm (luz roja).

Otra "limitación" de los sentidos es la necesidad de que exista un cambio notable en un estímulo antes de que nuestros órganos lo puedan percibir. Este fenómeno lo investigó ampliamente E. H. Weber en 1834; definió la fracción Weber como la relación entre el cambio requerido en un estímulo antes de que el ser humano perciba realmente que dicho estímulo ha cambiado del estímulo original.

Tabla 1.1

<i>Sentido</i>	<i>Fracción Weber</i>
Vista (brillantez, luz blanca)	1/60
Cinestesia (peso levantado)	1/50
Dolor (térmico en la piel)	1/30
Oído (tono medio, volumen moderado)	1/10
Presión	1/7
Olfato (olor de goma de India)	1/4
Gusto (sal de mesa)	1/3

Por ejemplo, una masa de 10 kilogramos tendrá que incrementarse alrededor de 0.2 kilogramos antes de que una persona que sostiene dicha carga note cualquier cambio. La tabla muestra que tenemos más facilidad para discriminar cambios en la intensidad luminosa y mucho menor facilidad para discriminar cambios en el sabor de las cosas. Así, a pesar de que nuestros aparatos sensores han evolucionado durante millones de años hasta alcanzar un grado de perfección adecuado para desenvolvernó en nuestro medio habitual, no pueden satisfacer las demandas del mundo

actual donde la ciencia, la tecnología y el comercio requieren que muchos de los aspectos del mundo real se determinen con extrema precisión.

Nuestra habilidad para comunicarnos también está limitada en cuanto a su alcance y a su contenido. Sin ayuda, podemos transmitir aproximadamente una palabra por segundo a través de una distancia de cerca de dos kilómetros. En la actualidad, las telecomunicaciones han permitido ampliar el alcance de la comunicación humana, pero todavía existe el problema de la velocidad en el intercambio de información. La información se mide en términos de la unidad más pequeña y simple, la cual es la transmisión de una decisión entre opciones igualmente probables, como en el caso de cara o cruz, sí o no, encendido o apagado. Lo anterior es particularmente adecuado para el sistema binario, donde 1 representa posiblemente sí y 0 representa no. Así, un bit (dígito binario) es la unidad básica de información. Por ejemplo, si alguien le pregunta el sexo de su único hijo y usted responde mujer, entonces usted habrá dado un bit de información. Del mismo modo, si hay 64 casas en la calle donde vive y usted le indica a alguien en la que usted vive, le habrá dado seis bit de información, ya que para extraer esta información habrá sido necesario hacer cuando menos seis preguntas con respuestas sí o no.

El cerebro humano puede aceptar y manejar sin ningún problema alrededor de 25 bit por segundo. Es fácil mostrar que una palabra en el idioma inglés tiene un contenido de información de aproximadamente cinco bit y una novela promedio tiene aproximadamente 250 000 bit. Por lo tanto una persona normal deberá ser capaz de leer una novela promedio en aproximadamente 10 000 segundos, a una velocidad de 25 bit/segundo. Pero comparemos lo anterior con la velocidad a la cual se muestra la información en una pantalla de televisión blanco y negro,  $37.5 \times 10^6$  bits/segundo.

Todas estas limitaciones, combinadas con la fragilidad física y la falta de capacidad del hombre para trabajar en ambientes hostiles, han motivado el avance de la mecanización y la automatización.

### **1.3 Mecanización**

Dado que las fuerzas generadas por los seres humanos son reducidas, fue necesario inventar dispositivos que amplificaran estas fuerzas, los cuales adquirieron la forma de máquinas. Las cinco máquinas más elementales, enumeradas por Hero de Alejandría, son la palanca, la rueda y el eje, la polea, la cuña y el tornillo. La palabra máquina es notablemente difícil de definir y la explicación del diccionario Webster es tan buena como cualquier otra: "una máquina es el intermediario entre la potencia motriz y aquellas partes que realmente llevan a cabo los movimientos necesarios para realizar el trabajo requerido".

En realidad, cuando un ser humano da la potencia motriz, la función como intermediario de la máquina consiste en transformar la potencia motriz humana en una forma que satisfaga los requerimientos de la pieza de trabajo. Las personas pueden generar suficiente energía para muchas actividades o tareas, pero con frecuencia esta energía no se encuentra en la forma adecuada. Por ejemplo, usted no tendría ninguna dificultad para subir un escalón de 50 cm, y si pesara 600 N, habría consumido 300 J de energía para subir el escalón. Ahora, a pesar de que la misma cantidad de energía podría levantar un peso de 6 kN a una altura de 5 centímetros, la magnitud de la fuerza haría que esta actividad quedara fuera del alcance de la capacidad humana. Se necesita una máquina para poder aplicar nuestra energía a la realización de esta actividad. Una palanca con una relación de 20:1 reduciría el esfuerzo humano a una fuerza mucho más manejable de 300 N, aunque para ello tendría que pagarse un precio ya que, para poder mover la carga 5 centímetros, el operador tendría que desplazar el extremo de control de la palanca a una distancia de 100 cm. Pero este es un precio razonable, dado que ahora la actividad queda dentro del alcance de la capacidad humana. De esta forma, la máquina actúa como un transformador de energía, convirtiendo la energía en una forma que resulta adecuada para una actividad o tarea dada.

Sin embargo, la capacidad de transformación de las máquinas no es infinita y son muchas las ocasiones en las que las limitaciones de las capacidades humanas imponen un problema demasiado grande para que lo pueda resolver una máquina. En estos casos, el poder muscular humano debe ser reemplazado por animales o motores. Los motores, o fuentes de energía primaria, transforman un tipo de energía que ocurre en forma natural en otro tipo de energía con mayor utilidad directa. El molino de viento, una de las primeras fuentes de energía primaria, transformaba la energía cinética presente en forma natural en el aire en movimiento, en la energía cinética de una piedra de molino en rotación. El motor de combustión interna transforma la energía química natural del petróleo en la energía cinética de un volante giratorio. La invención de estas máquinas ha permitido al hombre entrar a la era de la mecanización.

La mecanización, o utilización de las máquinas para llevar a cabo el trabajo de personas o animales, ha estado presente desde hace siglos. Su evolución fue particularmente rápida durante la Revolución Industrial, cuando el uso de la fuerza generada por el vapor permitió que muchas operaciones manuales fueran relegadas a las máquinas. Pero, a pesar de haber reducido en gran medida el esfuerzo físico, la mecanización no pudo librarnos de la carga de tener que controlarlo. Todavía era necesario que el hombre alimentara, guiara y corrigiera los movimientos de las máquinas. La siguiente etapa que revolucionaría el progreso tecnológico, la automatización, lo libraría de esta carga para dejarla “en manos” de la máquina.

### 1.4 Control automático

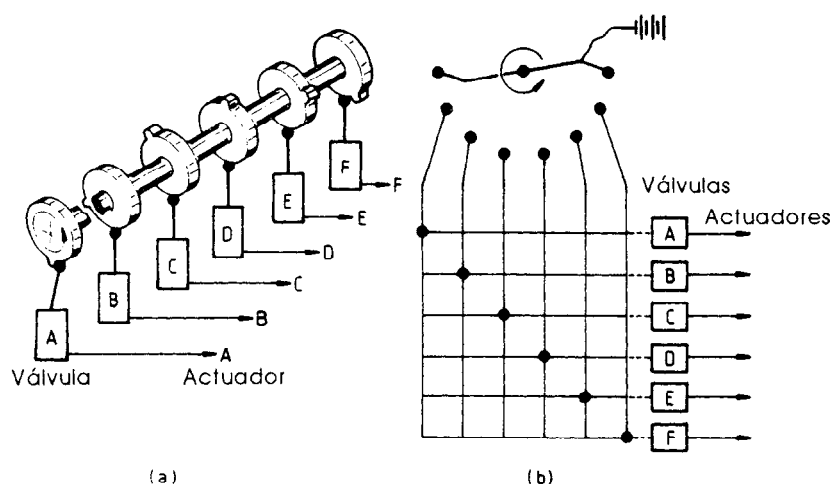
Antes de tratar de definir la automatización será necesario aclarar las ideas sobre el control, en particular el control automático. Este es un control que actúa solo, sin intervención humana. La mayoría de los actuales sistemas de control industrial no podrían funcionar si dependieran de operadores humanos. El tiempo de reacción inherente del hombre es aproximadamente 0.2 s y la tendencia de éste a aburrirse y distraerse, son algunos de los factores que lo excluyen del manejo de estos sistemas.

El control automático se divide en dos subsecciones principales: control del orden de los eventos y control de las variables físicas. A continuación se analiza cada uno de ellos en orden.

#### *Control del orden de los eventos*

Muchos procesos de manufactura requieren que se controle el orden de los eventos. Por ejemplo, una operación de perforación puede incluir la siguiente secuencia de eventos: (1) el componente se empuja a su posición, (2) el componente se sujeta en su sitio, (3) el componente se perfora, (4) se suelta el sujetador y (5) el componente se retira de la máquina. Esta tarea es sencilla para el operador humano pero también es en exceso repetitiva; el operador se aburre y su rendimiento puede dejar de ser satisfactorio. Sin embargo, como existe un programa de eventos definido con claridad resulta fácil convertir esta actividad en un sistema automático. El maravilloso autómatas del siglo XIX y los robots de la actualidad tienen una característica en común con este sistema: ambos deben poder programarse para seguir una secuencia determinada de eventos. Un autómatas puede programarse para levantar un bolígrafo, voltear la cabeza, girar los ojos y bajar nuevamente el bolígrafo. Un robot puede programarse para levantar un componente a alta temperatura, darle la vuelta y colocarlo sobre una máquina de estampación. ¿Cómo les decimos a estas máquinas lo que queremos que hagan? ¿Cómo las *programamos*?

En los primeros autómatas, ciertos mecanismos de relojería aseguraban la sincronización adecuada de cada movimiento. El principio de operación puede verse en las cajas musicales que usan un tambor giratorio cuya superficie está cubierta de pequeñas agujas. Conforme el tambor gira, las agujas golpean sobre pequeños dientes en forma de peine, cada uno de los cuales tiene un tono específico y la secuencia o arreglo ordenado de las agujas produce la tonada deseada. El tambor y las agujas constituyen el programa. Por supuesto, en el caso de los autómatas, los robots y otras formas de máquinas automáticas, es necesario producir una secuencia ordenada de *eventos*, no solamente de notas; pero el principio es el mismo. En muchos casos se emplea un árbol de levas para controlar los movimientos de un autómatas. En lugar de agujas en un tambor giratorio, el programa del árbol de levas utiliza bielas sobre un eje giratorio (figura 1.2(a)). Las



**Figura 1.2** Control del orden de los eventos: (a) programador de bielas  
(b) selector unitario y tablero de conexiones.

protuberancias de las bielas (los lóbulos) hacen contacto con interruptores o válvulas que causan que ciertos actuadores se extiendan y retraigan; el programa, o la sincronización de los eventos, puede variarse modificando las posiciones angulares relativas de las bielas.

La facilidad de la programación, la *programabilidad*, es una característica importante del control automático de una secuencia. Si los programas tienen que cambiarse en forma regular, entonces no es recomendable el programador de árbol de levas: su programabilidad es muy baja. El ajuste de las bielas es tedioso y requiere mucho tiempo así que, en conjunto, esta forma de control está restringida a sistemas con secuencias fijas, como la operación del engrane de válvulas de un motor.

El uso de selectores unitarios y tableros de conexiones puede mejorar la programabilidad (figura 1.2(b)). Como se muestra, el selector unitario avanza a una velocidad constante de contacto a contacto, seis en total. Cuando se cierra un contacto, se activa la columna correspondiente del tablero de conexiones. Las conexiones conectan las columnas y renglones del tablero de manera que, para una configuración de conexiones dada, la válvula A se energizará primero, seguida por la válvula B y así sucesivamente. La secuencia puede cambiarse reacomodando las conexiones.

Se puede obtener una mejor programabilidad con sistemas que utilizan tarjetas perforadas o cintas para almacenar las instrucciones. El movimiento de las tarjetas a través de una cabeza lectora pueden iniciar la secuencia apropiada de acciones; esta vieja idea es obra intelectual de Vaucanson, famoso por su autómatas. Asimismo, pueden emplearse orifi-

cios o ranuras que permitan el paso de la luz para activar y operar dispositivos fotoeléctricos, o agujas para activar interruptores mecánicos, o pulsadores para establecer contactos eléctricos. De hecho, en las antiguas pianolas de "rollo", pasaban chorros de aire a través de los orificios para activar el movimiento de los martillos. La programabilidad de estos sistemas es alta, dado que consiste en el sencillo acto de reemplazar una tarjeta o cinta por otra, o en perforar una nueva tarjeta o cinta.

Los sistemas recién descritos, ya sea que se trate de árboles de levas, tableros de conexiones o cintas móviles, son *controladores basados en tiempos*. El árbol de levas gira a una velocidad constante, como las manecillas de un reloj, y la sincronización de cada movimiento está determinada por la posición angular relativa de las bielas. El brazo del selector unitario se desplaza a una velocidad constante. En el caso de la cinta perforada, la cinta puede hacerse pasar a través de la cabeza lectora a una velocidad constante o a intervalos de tiempo espaciados en forma regular. En los tres casos el controlador avanza inexorablemente, activando las diversas acciones demandadas por el programa. Pero, ¿cómo sabe un sistema como éste que las acciones requeridas realmente se llevan a cabo? Considérese por ejemplo la secuencia descrita anteriormente para la alimentación, sujeción y perforación de un componente. La secuencia podría impulsarse con un árbol de levas, en cuyo caso los diversos eventos podrían iniciarse en tiempos predeterminados, por ejemplo, la sujeción se lleva a cabo 10 segundos después de la alimentación y la perforación 10 segundos después de la sujeción. ¿Pero qué sucede si un componente se atora mientras se está alimentando? Es obvio que no llegará a tiempo el sujetador. El árbol de levas continuará girando y 10 segundos después de que la tenaza haya terminado su acción, el taladro descenderá y posiblemente perforará un orificio en el sujetador o en la base de la máquina. Estos sucesos pueden evitarse utilizando controladores basados en movimientos en lugar de controladores basados en tiempos.

Los *controladores basados en eventos* utilizan la terminación de uno como señal para iniciar el siguiente. El principio de operación se ilustra en la figura 1.3. Un operador oprime el botón *a*; esto energiza el actuador *A*, el cual se extiende para oprimir el botón *b*, que opera el actuador *B*, y así sucesivamente. Se inicia una reacción en cadena; la conclusión de la cadena depende de la conclusión de cada enlace individual. Si un controlador como el mencionado se hubiera utilizado en la aplicación de alimentación-sujeción-perforación, no habría existido la posibilidad de que ocurriera el problema descrito. El componente atorado habría detenido el actuador de alimentación antes de que terminara su tarea; dicho evento no se habría completado y, por lo tanto, el siguiente, la sujeción del componente, no se habría iniciado. La secuencia se detendría en el punto en el cual se presenta el problema y se requeriría la presencia del operador para corregir el error.

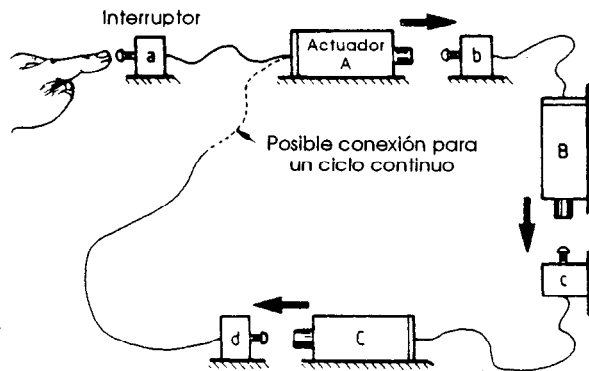


Figura 1.3 Control basado en eventos.

Los controladores basados en eventos son superiores a los controladores basados en tiempos en cuanto a que tienen una cierta idea de qué tan bien están llevando a cabo una actividad en particular. Un programa basado en eventos se detiene cuando sus sensores (los botones de la figura 1.3) dejan de indicar la conclusión satisfactoria de cualquier parte de la secuencia. La información se retroalimenta de la actividad al controlador y éste es el primer paso hacia la máquina inteligente.

### *Control de las variables físicas*

Cuando un controlador no tiene conocimiento de los resultados de sus propias acciones, se conoce como un *controlador de malla abierta*. Cuando la información relacionada con sus acciones se retroalimenta de la actividad al controlador, éste se convierte en un *controlador de malla cerrada*. Así, por lo que concierne a los controles de secuencia, el controlador basado en tiempos puede clasificarse como de malla abierta, en tanto que el controlador basado en eventos puede catalogarse como de malla cerrada. Pero, en general, esta terminología se asocia con mayor frecuencia al control de variables físicas como velocidad, intensidad de la luz o temperatura, más que al control del orden en que suceden los eventos.

El concepto de control de malla cerrada puede resultar aún más claro si se recurre a un ejemplo. Considérese el control de la velocidad de una turbina de vapor. Al llevar a cabo la instalación de la turbina, el ingeniero encargado puede medir la velocidad de la turbina y la posición de la válvula de vapor y generar una gráfica en la que se muestre la relación entre ambos factores. Para el uso siguiente de la turbina, los técnicos a cargo podrían consultar la gráfica para ajustar la válvula a una velocidad deseada en particular. Pero, ¿qué sucedería si la presión del vapor fuera reducida, si se aumentara la carga a la turbina o si partículas de suciedad restringieran el paso en los ductos de la válvula de control en ese día en particular? Es

claro que la velocidad de la turbina sería distinta al valor deseado. El sistema de control habría fallado en su tarea, porque no tiene conocimiento de los resultados de sus acciones. Estos sistemas se denominan de malla abierta, porque no existe una malla de información que regrese desde la salida.

El ciclo puede cerrarse midiendo los resultados de las acciones del controlador y utilizando dichas mediciones para influir en sus acciones futuras. En el ejemplo seleccionado, esto podría llevarse a cabo si se instalara un dispositivo para medir la velocidad en el eje de salida y se usara un operador humano para leer este medidor y realizar los ajustes necesarios en la válvula de control. Un paso adelante hacia el control automático podría ser la substitución del operador humano por un dispositivo mecánico o eléctrico. James Watt, uno de los pioneros del control automático, diseñó el gobernador de contrapesos para realizar esta actividad en el sistema de control de las primeras máquinas de vapor. En este regulador, unos contrapesos giratorios estaban engranados al eje de salida. Si la velocidad aumentaba, los contrapesos se movían hacia afuera y hacia arriba debido a la acción de las fuerzas centrífugas y su movimiento levantaba una manga que cerraba la válvula de vapor. Una reducción en la velocidad tenía el efecto contrario.

En el diagrama de bloques de la figura 1.4 se muestra un sistema de malla cerrada y sus elementos integrantes más importantes: medición, detección de errores y accionamiento. En el ejemplo de control de velocidad, el valor de entrada era la velocidad deseada y la cantidad controlada era la salida o velocidad real. El proceso o planta era la turbina; la carga y medición, la detección de errores y el accionamiento consistían ya sea en un operador humano o, en el caso automático, en un dispositivo como el regulador de contrapesos. La detección de errores requiere que la salida se sustraiga del valor de entrada, lo que ha llevado a la forma de retroalimentación que se conoce como *retroalimentación negativa*.

Existen tres clasificaciones principales de los sistemas de retroalimentación negativa: *servomecanismos*, *controles de proceso* y *regulado-*

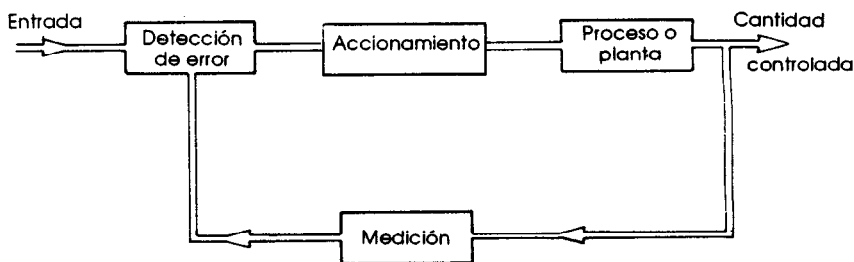


Figura 1.4 Diagrama de bloques de un sistema de malla cerrada.



res. Los servomecanismos se usan para hacer que el movimiento de un miembro de salida siga el de un miembro de entrada con una amplificación de la potencia. Un ejemplo de esto es el control de un torno automático en donde la salida o resultado es la posición de la herramienta de corte y la entrada podría derivarse de una plantilla cortada con la forma deseada o, posiblemente, de una cinta de computadora. Mientras que los servomecanismos están restringidos al control de variables cinemáticas, los controles de proceso abarcan un campo mucho más extenso, incluyendo control de la presión, la acidez, la temperatura, etc. Finalmente, la clase de los reguladores está restringida a sistemas con entradas fijas, como por ejemplo el control del nivel de potencial.

La principal ventaja del control de malla cerrada es la reducción del efecto de perturbaciones como pueden ser aumento en la carga, reducción en la presión del vapor y otros factores similares. Una de las desventajas más importantes de este tipo de control es la posibilidad de que surja la inestabilidad, una situación en la que la variable controlada tienda a salir de control, y la malla de control, por así decirlo, persiga su propia cola.

### ***Cualidades complementarias del ser humano y de las máquinas***

Hasta ahora se ha dado mucha atención a las limitaciones humanas y a la forma en que han impedido su intervención en la malla de control. Sin embargo, no debemos olvidar que las personas son creativas, pueden improvisar, definir prioridades y establecer valores; pueden razonar. Si se comparan estas ventajas con las desventajas mencionadas anteriormente, es posible asignar tareas orientadas al control tanto a los seres humanos como a las máquinas. Esto ya lo hicieron Johnsen y Corliss (1969) como se muestra en la tabla 1.2.

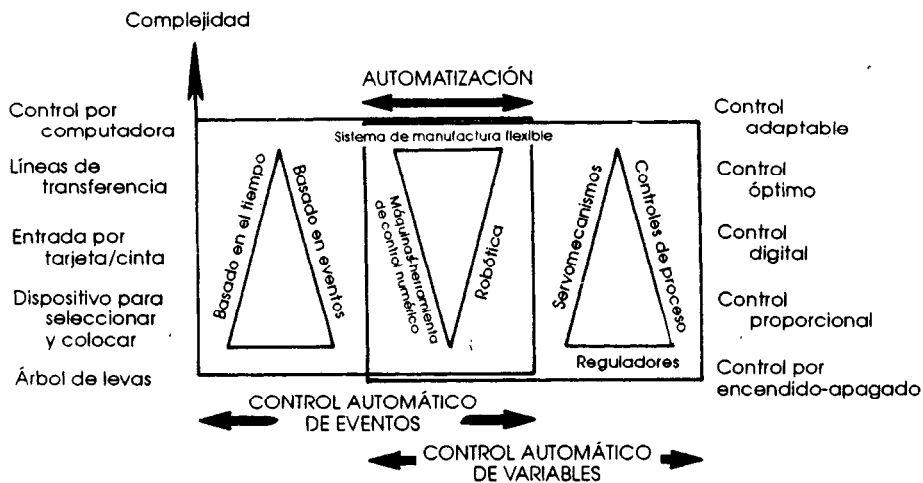
Tabla 1.2

<i>Tareas adecuadas para las personas</i>	<i>Tareas adecuadas para la máquina</i>
Reconocimiento de patrones	Monitoreo de entradas de canales múltiples
Identificación de blancos	Manipulación aburrida, repetitiva
Manipulación novedosa, exploratoria	Movimientos de precisión y aplicaciones de fuerza
Memoria a largo plazo	Movimientos a alta velocidad
Detección de problemas, operaciones de emergencia	Memoria a corto plazo
Planteamiento de hipótesis, generación de ideas, planificación	Cálculo
Interpretación de datos con formato variable	Monitoreo
Pensamiento inductivo	Análisis deductivo
Definición de metas, prioridades, evaluación de resultados	Elaboración de estrategias óptimas
	Movimientos no antropomórficos

### 1.5 Automatización

Fue necesario primero aclarar los puntos de vista acerca del control automático antes de pasar al tema de la automatización, ya que éste es un concepto mucho más complicado. La palabra automatización proviene de la contracción de los términos en inglés *automatic motivation* (motivación automática) y fue usada por primera vez en la década de los años cuarenta por un ingeniero de la *Ford Motor Company* para describir la operación colectiva de muchas máquinas interconectadas en su planta de Detroit. Las máquinas podían fresar, perforar, rectificar y terminar un monobloc, dejando el producto terminado al final de la línea. De igual forma que con las operaciones de maquinado, el sistema estaba programado para hacer las tareas poco productivas de sujeción y manejo que anteriormente se llevaban a cabo en forma manual. EL esfuerzo humano se requería sólo para supervisar las máquinas y revisar la calidad del producto terminado.

Hasta ahora no ha sido posible establecer una definición clara y precisa de automatización. Los autores prefieren la definición dada por la *Enciclopedia Británica*: ahí, automatización se define como “el desempeño de operaciones automáticas dirigidas por medio de comandos programados con una medición automática de la acción, retroalimentación y toma de decisiones”.



**Figura 1.5** La automatización abarca el control de los eventos y el control de las variables.

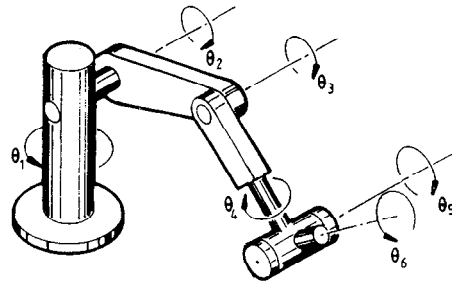
Esta definición indica que parte de la automatización consiste en un programa para determinar el orden de los eventos así como para instruir al sistema sobre cómo debe llevarse a cabo cada uno de los pasos de la operación. La computadora ofrece la forma más flexible de programación, por lo que no resulta sorprendente que en la actualidad la automatización tienda a asociarse con el control por computadora.

De esta forma, la automatización abarca tanto el control automático de eventos como el control automático de variables y esto se ilustra en la figura 1.5. Por ejemplo, pueden usarse desde sencillos árboles de levas hasta computadoras para controlar el orden de los eventos, pero si no hay control (o no es necesario el control) sobre las variables en cada una de las etapas de la secuencia, entonces el sistema no será un ejemplo de una verdadera automatización. Así, el sencillo dispositivo de selección y colocación para recoger y transferir componentes queda excluido de la lista de sistemas automatizados. Y sorprendentemente, la "automatización original de Detroit" también queda excluida de la lista. En la actualidad, ésta se clasifica como una línea de transferencia. Por otra parte, el sencillo control de encendido y apagado o los mucho más complicados controladores adaptables sí pueden emplearse para controlar las variables físicas en cualquier etapa de un proceso dado, pero si no existe control (o si dicho control no es necesario) sobre la orden en la cual se llevan a cabo los diversos procesos, entonces nuevamente el sistema no representa una automatización verdadera. Así, el control de la temperatura por medio de un termostato o incluso el control digital de la posición no representan un verdadero sistema automatizado.

La verdadera automatización se representa en el área traslapada de la figura 1.5. Los ejemplos de automatización abundan: procesos para obtener productos químicos, producción de acero, transporte, almacenamiento, para nombrar unos cuantos. Sin embargo, la limitación de espacio nos ha restringido a realizar un análisis de aquellos ejemplos de automatización que son directamente relevantes al tema de este libro: robótica, máquinas de control numérico y su combinación en sistemas de manufactura flexible.

## 1.6 Robótica

El robot es el epítome de la automatización. La palabra en sí misma fue introducida en 1917 por Karel Capek en su cuento corto *Opilec*, pero recibió mucho mayor publicidad en 1920 con su famosa obra *RUR* (*Rossum's Universal Robots*): *robota* es la palabra checoeslovaca para labor monótona o trabajos forzados. Desde entonces ha aparecido un gran número de robots dentro de la ciencia ficción, muchos de ellos con aviesas intenciones hacia la raza humana. Sin embargo, la historia de los verdade-



**Figura 1.6** Los seis grados de libertad de un manipulador.

ros robots no comienza sino hasta 1954 cuando un ingeniero norteamericano llamado George Devol registró una patente llamada *Programmed article transfer* (Transferencia automática de artículos). Esta patente condujo al primer robot industrial, fabricado en 1962 por *Unimation, Inc.*, una compañía fundada por Joseph Engleberger en 1958 (Engleberger, 1980).

Como en el caso de la automatización, el robot industrial ha generado una multitud de definiciones, de ellas, la adoptada por el *Robot Institute of America* (Instituto Norteamericano de Robots) es la que tiene actualmente mayor aceptación: un robot industrial es un manipulador reprogramable con funciones múltiples diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados variables para el desempeño de una gran diversidad de tareas. Las palabras claves que distinguen a los robots de otras máquinas son “manipulador” y “reprogramable”.

La *manipulación* es el acto de sujetar un objeto y cambiar su posición y orientación en el espacio. Los seres humanos dedican gran parte de su tiempo a manipular objetos: levantar un bolígrafo y escribir con él es un ejemplo característico. Es posible que para llevar a cabo estas tareas el manipulador deba producir hasta seis movimientos independientes. Esto es necesario, ya que la posición de un objeto en el espacio la determinan tres coordenadas en un referencial ortogonal fijo, así como sus rotaciones angulares alrededor de cada uno de los ejes del referencial. Esto significa que un manipulador para fines generales requiere contar cuando menos con seis actuadores (figura 1.6). Muchos manipuladores son antropomórficos, es decir, parecen brazos humanos; esto no debe ser sorprendente dado que con frecuencia su propósito es reemplazar trabajadores humanos, y deben ser adecuados para ambientes diseñados para las personas. Es por ello que frecuentemente el manipulador se conoce como el brazo, la muñeca y la mano del robot, aun cuando en fechas recientes se ha preferido el término “efector final” dado que incluye tanto herramientas como dispositivos de succión y magnéticos, así como sujetadores antropomórficos.

Sin embargo, la habilidad para manipular objetos no es en sí misma suficiente para distinguir al robot de otras máquinas. Algunos de los primeros autómatas, máquinas que se mueven y actúan solas, incluían cierta manipulación. El “niño escritor” de Jaquet Droz (1752–1791) tenía la apariencia de un niño de cuatro años con el pelo rizado. Este autómata sostenía una pluma de ganso en su mano derecha y cuando se activaba el mecanismo, sumergía la pluma en un tintero, la escurría dos veces, colocaba la mano al inicio de la página y comenzaba a escribir. Más recientemente, el advenimiento de la automatización ha conducido a la fabricación de una multitud de máquinas automáticas para sujetar y transferir componentes durante los procesos de producción. Por ejemplo, muchas prensas de imprenta utilizan tenazas para levantar un pliego de papel por vez e insertarlo en la prensa. Estas máquinas tienen algo en común con los autómatas: están diseñadas para hacer una sola cosa y solamente una. Al no ser modificables y no tener versatilidad, estos sistemas se justifican únicamente si el programa fijo se ha de emplear durante un periodo prolongado. Por definición, dichos sistemas, aun cuando sea inherente una manipulación, han sido excluidos de la categoría de los robots industriales.

Existe cierta confusión acerca de la relación entre los robots industriales y los teleoperadores dado que, especialmente, los últimos guardan con frecuencia gran similitud con los primeros (Johnsen y Corliss, 1969). Por ejemplo, los primeros teleoperadores utilizados para manejar materiales radiactivos, parecían brazos de robots. Pero la diferencia es clara: el teleoperador lo dirige un operador humano, mientras que el robot es automático. Más adelante (capítulo 10) se verá que es posible diseñar sistemas que permiten alternar entre el papel del teleoperador y el robot.

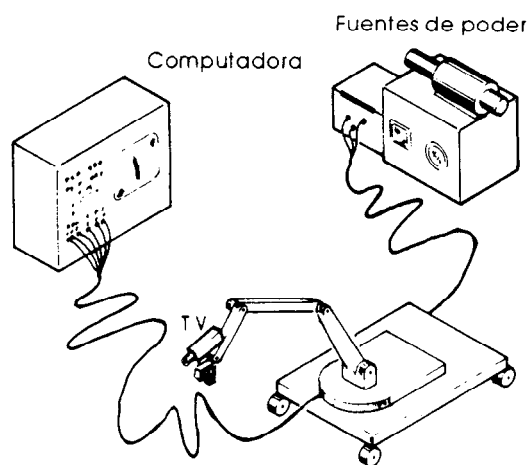
## **1.7 Los elementos de un robot industrial**

En términos antropomórficos, el robot industrial requiere un cerebro, sentidos, un torrente sanguíneo, un brazo, una muñeca y una mano con los músculos apropiados y posiblemente piernas y pies, también con los músculos correspondientes. En un robot industrial típico, los elementos equivalentes en términos de máquinas podrían ser una computadora, dispositivos de medición, un generador de potencia eléctrica, hidráulica o neumática, un manipulador y, posiblemente, ruedas. Estos componentes se ilustran en la figura 1.7.

El análisis anterior sobre la manipulación sirvió para aclarar la necesidad de contar con un brazo, una muñeca y un efector final. También se explicó la necesidad de tener cuando menos seis grados de libertad en un robot de usos generales. Además, como se verá en el capítulo 2, existen muchas configuraciones de robots capaces de lograr seis grados de libertad.

Las dimensiones finitas de los diversos elementos mecánicos restringen el efector final de un robot a un volumen de trabajo en particular; por esto es necesario asegurar que la tarea por ejecutar no requiera movimientos que excedan los límites de este volumen. Los volúmenes normales de trabajo son adecuados para la mayoría de los procesos productivos, pero algunas aplicaciones, como el almacenamiento automático en bodegas, necesitan incrementar el volumen de trabajo dándole cierta movilidad al robot. Las aplicaciones del futuro, como el robot doméstico, también demandarán una cierta movilidad. La solución obvia a este problema consiste en instalar ruedas al robot, pero estas ruedas requerirán una superficie plana. Los robots para terrenos accidentados, previstos por las fuerzas armadas, y algunos movimientos requeridos en el interior de las casas, como el ascenso de escaleras, requerirán el uso de patas en lugar de ruedas. Este aspecto será examinado con detalle en el capítulo 3.

Los brazos, las muñecas, los efectores finales y las patas necesitan músculos para su movimiento. En la práctica, éstos pueden animarse con potencia neumática, hidráulica o eléctrica. La potencia neumática está limitada, en términos generales, a robots que seleccionan y colocan artículos, en los que los actuadores se pueden mover rápidamente, hasta que son detenidos por fines de carrera mecánicos. Sin embargo, la compresibilidad del aire hace que el control preciso de la velocidad y la posición sea extremadamente difícil, por lo que la potencia neumática rara vez se encuentra en los sistemas robot más complejos. En el caso de estos sistemas, los principales contendientes son los actuadores hidráulicos y eléctricos. Los actuadores hidráulicos son compactos y tienen la capacidad



**Figura 1.7** Los elementos de un sistema robot.

de producir fuerzas o pares de gran magnitud. En la actualidad son la forma más común de suministrar potencia, particularmente en el caso de los robots de mayor tamaño. Los actuadores eléctricos, aun cuando cada vez son más comunes debido a los recientes avances técnicos, todavía están limitados a un 30 % de la población existente de robots. Los robots animados por energía eléctrica tienden a ser más precisos que sus equivalentes hidráulicos pero, a diferencia de los actuadores hidráulicos, los motores eléctricos requieren reductores, lo cual hace que aumente el costo del sistema. En el capítulo 6 se presenta una comparación más detallada de los sistemas hidráulicos, eléctricos y neumáticos.

Entre los requerimientos de percepción de un robot pueden distinguirse dos categorías distintas: percepción interna y externa. Si se exige a un efector final que se mueva a un punto en particular del espacio, con una orientación particular, los diversos elementos mecánicos (tronco, brazo, muñeca) tendrán que desplazarse a las posiciones requeridas. Será necesario instalar dispositivos de medición en cada uno de los grados de libertad de manera que el robot sepa cuándo ha llegado a dichas posiciones. Esta percepción interna puede lograrse por medio de potenciómetros u otros dispositivos para medición de la posición sobre un plano de rotación.

Por otro lado, la percepción externa es el mecanismo de interacción con el entorno del robot. La primera generación de robots no la tenía, pero la segunda generación está ahora equipada con sensores de visión, tacto o de ambos. La visión, basada en técnicas de televisión, permite al robot reconocer un componente particular, determinar su posición y su orientación y así ordenar a sus actuadores para guiar su efector final a tal posición. Los robots que posean el sentido del tacto, posiblemente logrado con galgas tensométricas, estarán capacitados para reaccionar a las fuerzas generadas durante un ensamble automático. Tanto la percepción interna como la externa, recibirán más atención en los capítulos 6 y 8.

El cerebro o controlador del robot generalmente adopta la forma de un microprocesador o minicomputadora. El controlador tiene tres funciones principales:

- iniciar y terminar los movimientos del manipulador de acuerdo con una secuencia y en los puntos deseados.
- almacenar información de la secuencia y la posición en la memoria.
- realizar la interfase con el entorno o ambiente en que opera el robot.

Ya hemos tenido contacto con algunos de los controladores más elementales, en la forma de árboles de levas o tableros de conexiones, aplicados al control de una secuencia. En sistemas como éstos, la iniciación

de cada evento la determina el controlador; el movimiento real en sí mismo lo controlan fines de carrera que restringen el movimiento del robot entre dos puntos extremos en cada eje. No existe retroalimentación (a excepción de la información acerca de la terminación de la actividad), por lo que estos sistemas se conocen con frecuencia como robots no controlados o sin servomecanismo. También se denominan robots de extremo a extremo, para levantar y colocar o de secuencia limitada. Su naturaleza de malla abierta los restringe a la realización de tareas simples como la transferencia de partes de un lugar a otro. Debe hacerse notar que con el fin de que dichos sistemas puedan calificar como robots industriales, deben ser *reprogramables*. En la práctica, a pesar de que el ordenamiento de los eventos con frecuencia se lleva a cabo fácilmente a través de un teclado de computadora, la programabilidad de muchos robots no controlados o sin servomecanismo es muy baja debido a la compleja configuración de los fines de carrera, los interruptores de fin de carrera y los interruptores de sincronización que determinan la magnitud de los movimientos. Por otra parte, estos robots cuentan con varias ventajas como bajo costo, precisión, confiabilidad y sencillez.

Los robots sin servomecanismo no son adecuados para aplicaciones que requieren que un efector final se mueva a diversas posiciones dentro de un cierto volumen de trabajo. En tales casos, es necesario utilizar robots *servocontrolados*. Como implica el término, estos son sistemas de malla cerrada en los cuales necesitan medirse las variables controladas. Además de permitir el control de la posición, estos sistemas pueden usarse para controlar la velocidad y la aceleración. Las señales retroalimentadas se comparan con valores predeterminados, almacenados en la memoria del controlador y las señales de error resultantes dirigen a los actuadores hacia sus objetivos. Puede ordenarse a los efectores finales que se muevan o se detengan en cualquier sitio dentro de su volumen de trabajo. Con frecuencia se emplean controladores programables basados en un microprocesador o en una minicomputadora, que cuentan con memorias de gran tamaño que permiten almacenar y ejecutar más de un programa y tienen la habilidad para conmutar a otros segmentos o subrutinas. Pueden utilizarse señales generadas externamente, como las derivadas de un teclado de computadora, para seleccionar estos programas a partir de la memoria.

Los robots controlados por un servomecanismo pueden separarse en dos clases principales: robots punto a punto (PTP) y de trayectoria continua (CP). El programa para el control PTP requiere solamente la especificación de las posiciones inicial y final para un movimiento en particular. Al reproducir los puntos almacenados, los actuadores se conducen sobre cada eje, seis posibles, a sus posiciones individuales deseadas. La trayectoria real descrita por el efector final no es fácilmente predecible bajo el control PTP a menos que la distancia entre los puntos de la trayectoria sea pequeña.



Existen muchas actividades que requieren un control preciso de la trayectoria entre dos puntos: la soldadura continua y la pintura por rocío son ejemplos comunes. En estos casos, el control PTP puede ser inadecuado y posiblemente resulte necesario emplear un control CP. El robot controlado continuamente a lo largo de toda la trayectoria (CP) puede programarse en tiempo real sujetando su efector final y guiándolo a través de los movimientos requeridos. Mediante muestreo con una base de tiempo, generalmente de 60 a 80 Hz, los datos relativos a la posición y la orientación pueden almacenarse en una cinta o disco. Cuando estos datos se reproducen nuevamente, las propiedades filtrantes de la dinámica del robot producen un suave movimiento continuo a lo largo de la trayectoria deseada.

La tarea a realizar por el robot la determina un programa que especifica el orden de los eventos y el valor requerido de las variables físicas en cada uno. Ya se ha explicado que la habilidad para cambiar este programa con facilidad, la programabilidad, es una característica distintiva de los robots. La programación puede adoptar varias formas y ya hemos visto algunas de ellas. En la *programación manual* los puntos extremos de cada grado de libertad se fijan por medios físicos como bielas o interruptores de límite y en la *programación por enseñanza* todos los puntos de movimiento se almacenan en la memoria para lo que se guía el efector final a lo largo de la trayectoria deseada. Pero además de estos dos métodos existe ahora una gran tendencia hacia la *programación fuera de línea*, es decir, programación que no requiere contar con el robot ni con las piezas de trabajo reales. La programación fuera de línea es deseable cuando las aplicaciones requieren movimientos complejos, por ejemplo, en las tareas de ensamble. También es recomendable para la producción de lotes pequeños, donde tal vez no sea posible liberar un robot y fabricar las partes prototipo necesarias para programar por enseñanza al robot. Posteriormente veremos que la programación fuera de línea también es adecuada cuando resulta necesario enlazar el robot a otras bases de datos, como las salidas de sistemas de diseño mediante computadora (CAD). Un programa fuera de línea requiere un lenguaje robot para describir todas las operaciones necesarias en una forma simbólica adecuada. Uno de los lenguajes robot más populares es VAL, un lenguaje de alto nivel creado por *Unimation* para controlar y programar sus robots *Unimate* y *Puma*.

### 1.8 El porqué de los robots

Ya se ha dedicado algún tiempo a enumerar las limitaciones del operador humano y a mostrar cómo la mecanización y la automatización han llegado al rescate. Ahora puede profundizarse un poco más este punto con respecto a los robots.

- Pueden ser más fuertes, lo que les permite levantar pesos considerables y aplicar mayores fuerzas.
- No se cansan y pueden trabajar fácilmente las veinticuatro horas del día, siete días a la semana. No necesitan descansos para el café o para la comida. Y rara vez se enferman.
- Son consistentes. Una vez que se han instruido para realizar un trabajo pueden repetirlo, prácticamente en forma indefinida, con un alto grado de precisión. El desempeño humano tiende a deteriorarse con el paso del tiempo.
- Son casi completamente inmunes a su ambiente. Pueden trabajar en entornos extremadamente fríos o calientes, o en áreas donde existe el peligro de gases tóxicos o radiación. Manipulan objetos con temperaturas muy elevadas. Son capaces de trabajar en la oscuridad.

La anterior es una lista de atractivos muy impresionante. Pero, ¿qué piensan los usuarios acerca de esto? Diversas investigaciones entre usuarios industriales muestran las razones de la industria para la incorporación de robots. En 1979 la lista de prioridades para la industria japonesa era la siguiente (Hasegawa, 1979):

• ahorro de mano de obra	44.5%
• mejoramiento de las condiciones laborales	24.9%
• mayor flexibilidad	13.5%
• facilidad del control de la producción	8.0%
• otros	9.0%

Un estudio similar en la industria alemana se tradujo en la siguiente lista de prioridades (Vicentine, 1983):

- aumento de la productividad
- reducción de los costos de mano de obra
- rendimiento de la inversión
- mejoramiento de la calidad
- condiciones de trabajo más humanas

Estos estudios, al igual que muchos otros, asignan un peso enorme a la reducción en los costos de la mano de obra. Esto es particularmente importante por dos razones: el costo de la mano de obra ha aumentado en un factor de 2.5 a 4 durante los últimos 10 años; el costo por hora de un robot, tomando en cuenta la depreciación, el pago de intereses, el mantenimiento, etc., se ha reducido en aproximadamente un 15% durante el mismo periodo. El aumento en los costos de mano de obra ha sido causado

en gran medida por las mayores aspiraciones de los trabajadores, mientras que la disminución en el costo de los robots se ha debido a una mejor tecnología, especialmente a los rápidos avances en microelectrónica. La importancia de estas tendencias resulta obvia si se considera que un robot puede trabajar dos o, incluso, tres turnos al día. Lo anterior, aunado a los incrementos potenciales en calidad y los ahorros en materiales, como en el caso de la pintura por rocío, en donde puede usarse una menor cantidad de pintura, ha llevado a una mayor concientización respecto a los beneficios económicos que se derivan de la introducción de robots industriales.

Estas consideraciones han originado un aumento en el interés por el robot industrial. Un estudio llevado a cabo por la *British Robot Association* (BRA, 1984) (Asociación Británica de Robots) mostró una población mundial de aproximadamente 98 000 robots (excluyendo a los países de Europa Oriental y la ex URSS). La distribución de esta población era la siguiente:

Japón	64 000	Francia	3 380	Suecia	2 400
Estados Unidos	13 000	Italia	2 700	Bélgica	860
Alemania	6 600	Inglaterra	2 623	España	516

### 1.9 Operaciones con robots

En 1984 habían 2 623 robots en operación en Inglaterra. La distribución de las aplicaciones conocidas era:

soldadura por puntos	471	(122)
moldeo por inyección	412	(136)
soldadura por arco	341	(107)
servicio a máquinas herramienta	213	(48)
ensamble	199	(96)
recubrimiento de superficies	177	(24)
diversos	175	(20)
educación, investigación	122	(41)
manejo, movimiento de charolas	102	(36)
servicio de herramientas de prensa	59	(11)
esmerilado, recubrimientos	43	(16)
pruebas de inspección	41	(11)
fundición por inyección	40	(2)
pegado/sellado	23	(9)
fundición a la cera perdida	14	(0)

Las cifras entre paréntesis (que dan un total de 679) representan aquellos robots que estaban instalados realmente durante 1984.

Existen muchas maneras de clasificar las operaciones en las que intervienen robots: según el método de control, por industria, por nivel de complejidad. Los autores han preferido establecer una distinción entre las operaciones en términos del uso del efector final del robot, es decir, ¿se trata de una tenaza o una herramienta, o puede ser cualesquiera de ellas?

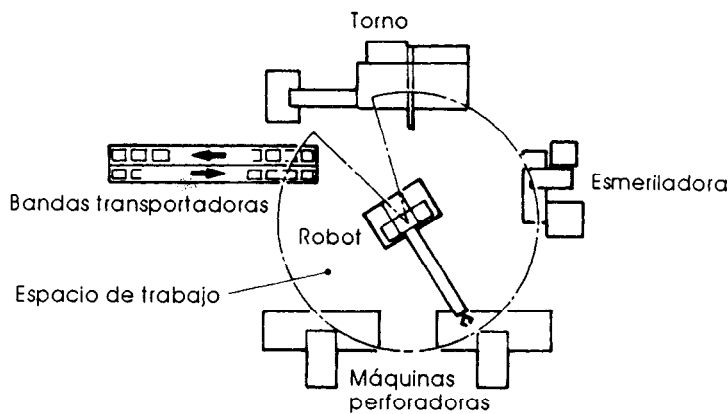
### ***Operaciones en donde el efector final es generalmente una tenaza***

Esta categoría incluye aquellas actividades en las que el robot se usa para manejar productos, cargar o descargar máquinas, transferir o reorientar componentes. En estos casos, el efector final puede adoptar una amplia variedad de formas, desde tenazas operadas mecánicamente hasta succionadores, pero su función principal sigue siendo sujetar firmemente los componentes mientras se mueven o se ejecuta una operación en o con ellos.

La aplicación de los robots para el manejo de materiales ofrece gran potencial para librar a la mano de obra humana de trabajos monótonos, cansados o peligrosos. Incluye la transferencia de partes entre sistemas de bandas transportadoras o líneas de proceso en los que las partes pueden ser pesadas, estar calientes, tener propiedades abrasivas o, incluso, ser radiactivas.

Además, se ha demostrado que si se usan robots hay menores índices de ruptura cuando se manejan objetos muy frágiles, como en el caso de cinescopios de televisión. El transporte de objetos de gran tamaño y pesados por medio de plataformas, como en el caso de monoblocs o productos químicos, es otro ejemplo del manejo de materiales por medio de robots. En la actualidad, al llevar a cabo una operación de transporte de plataformas, es necesario presentar los productos al robot en forma ordenada y cuando el robot ha completado el programa emite una señal para que se retire la plataforma llena. Los robots de segunda generación se equipan ahora con visión artificial por computadora para permitirles manejar productos que se les presentan en forma desordenada o que no pueden ser fácilmente clasificados por medios mecánicos.

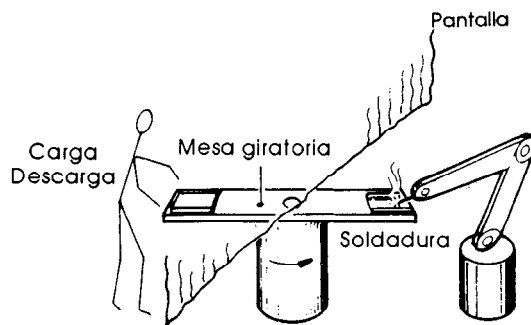
Otro importante uso se relaciona con el servicio a máquinas como prensas, máquinas para moldeo por inyección, máquinas de inyección de metales, máquinas herramienta, etc. Los primeros tres tipos tienen que ver con tareas en particular desagradables para el operador humano y ésta es una de las principales razones para la introducción de los robots. La fundición por inyección, por ejemplo, se lleva a cabo a altas temperaturas y es peligroso. En muchos talleres de fundición por inyección los moldes se lubrican y se cargan automáticamente con aluminio o zinc fundido. Los robots industriales se usan para descargar el molde, sumergirlo en un tanque de enfriamiento y, después, colocarlo en una prensa de formación.



**Figura 1.8** Una célula de maquinado atendida por un robot.

Dichas tareas resultan extremadamente desagradables para un operador humano.

Por otra parte, el uso de robots industriales para dar servicio a máquinas herramienta atiende más a la necesidad de lograr una mayor productividad que a la eliminación de actividades desagradables. También es un paso muy importante hacia la fábrica completamente automatizada. Las mayores ganancias se logran cuando el robot atiende a varias máquinas, agrupadas en lo que se ha denominado una *célula*. Al dar servicio a la célula, el robot no sólo maneja los materiales, sino que además garantiza una utilización óptima en cada una de las máquinas de la *célula*. Lo anterior requiere el flujo de información entre el robot y las otras máquinas. Los distintos componentes requieren programas diferentes y es aquí donde la programabilidad de los robots ofrece una importante ventaja. En la figura 1.8 se muestra una configuración común de una *célula* de maquinado. Las baterías de entrada y salida suministran materias primas a la *célula* y retiran las partes terminadas (Martins, y colaboradores, 1983). El robot quita el artículo terminado de las mordazas del torno y coloca el siguiente con el auxilio de una tenaza doble (véase el capítulo 3). Después de maquinar uno de los extremos de la pieza de trabajo, el robot la coloca en un dispositivo giratorio que la hace rotar 180° y la reinserta en las mordazas. A continuación, el robot presenta la pieza en turno a una máquina fresadora para el fresado de la superficie y después a una máquina de perforación de control numérico (NC). Al término de la operación de maquinado, el robot puede presentar la parte a una estación de medición donde verifica si se ha logrado un nivel de calidad aceptable. Finalmente, la parte terminada se coloca en un sistema de transporte de salida.



**Figura 1.9** Hombre y robot trabajando juntos en una actividad de soldadura.

***Operaciones en las que el efector final es generalmente una herramienta***

La soldadura por puntos domina esta categoría. Para llevar a cabo una soldadura por puntos, el robot conduce el efector final, una pistola de soldadura, al sitio deseado e inicia la secuencia para soldar consistente en sujetar la pieza, aplicar corriente, aplicar presión, cortar corriente y soltar la pieza. Un control punto a punto (PTP) es suficiente para esta tarea, haciendo que un soldador experimentado le enseñe la tarea al robot. Con la primera generación de robots “ciegos”, se necesita que cada pieza de trabajo quede firmemente sujeta en el mismo sitio respecto a la ubicación del robot; esto con frecuencia requiere el uso de soportes y plantillas muy costosas.

La industria automotriz es el principal usuario de robots soldadores y todos los principales fabricantes de automóviles participan de la nueva tecnología. La planta de Toyota en Tahara es un buen ejemplo de la flexibilidad que puede obtenerse con el uso de un proceso de soldadura que emplea robots: tres tipos distintos de carrocerías y siete tipos diferentes de armazones pasan por la misma línea en un ciclo con una duración de poco menos de dos minutos (Hartley, 1983). Conforme cada carrocería avanza por la línea la computadora a cargo del control de la producción, transfiere a los robots soldadores el programa apropiado. En la actualidad es necesario mantener la carrocería estática durante el proceso de soldadura, pero ciertas innovaciones en los sistemas de control pueden hacer factible que el robot lleve a cabo el proceso de soldadura mientras sigue la carrocería del automóvil en movimiento.

La soldadura por arco, en la cual es necesario aplicar una costura continua de soldadura, requiere un control de trayectoria continua (CP) en lugar de un control punto a punto (PTP). La cabeza de soldadura debe moverse con suavidad a baja velocidad (8 a 25 mm/s) y el sistema de control debe asegurar que la repetitividad de la trayectoria sea del orden

de  $\pm 0.5$  mm. Aun cuando esta especificación es extremosa, actualmente hay más de treinta fabricantes de robots capaces de realizar una soldadura de arco. En la figura 1.9 se ilustra una aplicación común, en la cual se muestra un robot soldador suministrado por una mesa giratoria (Warnecke y Schraft, 1979). Un operador, ubicado en la estación de carga, monta los componentes (en este caso las partes de un asiento de automóvil) en un portapiezas. La mesa giratoria da entonces un giro de  $180^\circ$ , con lo que se colocan los componentes en la estación de soldadura. Las estaciones de carga y soldadura están separadas por una pantalla que protege al operador contra los gases, el calor y la luz producidos por la soldadura. Parece que la productividad de los robots soldadores es entre dos y cuatro veces superior a la de los soldadores manuales; las principales mejoras se atribuyen a la habilidad del robot para realizar extensas soldaduras continuas y para llevar rápidos movimientos entre soldaduras. Una de las principales limitaciones es la incapacidad de los robots de primera generación para detectar el desgaste en los portapiezas y aditamentos, la retracción de los componentes soldados o la distorsión por calor de las partes componentes. Lo anterior ha llevado al diseño de robots de segunda generación con la capacidad para seguir una unión, usando información sobre el potencial y la corriente de soldadura, sensores mecánicos o, más recientemente, visión artificial.

El revestimiento de superficies es otra de las principales áreas en las que se usan los robots industriales. La industria automotriz usa, en particular, robots para pintar carrocerías automotrices y para rociar de revestimientos de PVC en el chasis de los automóviles (Hareland, 1983). La industria sanitaria también emplea robots para la aplicación de esmaltes y acabados brillantes en tinajas, lavabos, tazas, etc.; la industria de enseres domésticos recurre a los robots para la aplicación de acabados en refrigeradores, congeladores, lavadoras, etc. Además de las pinturas, existen otros recubrimientos que también se aplican por medio de robots como lubricantes, materiales aislantes, líquidos para limpieza, resinas plásticas, plasmas y chocolate. El revestimiento de superficies, en particular el rocío de pintura, es un trabajo de precisión que debe llevarse a cabo en un ambiente bastante desagradable. El robot industrial puede soportar los rigores de este ambiente tóxico y, a través de una programación de enseñanza, es posible transferir la pericia del operador humano al robot. Dado que existe la posibilidad de que se generen chispas al emplear activadores eléctricos, el uso de actuadores hidráulicos en las cabinas de rocío de pintura donde existe el peligro de una explosión se ha convertido en una práctica común.

### ***Usos donde el efector final puede ser una tenaza o una herramienta***

Con frecuencia se requiere que los robots industriales lleven a cabo operaciones de maquinado y acabado como perforación, fresado, corte, ranurado

y desbastado. El desbastado de fundiciones, por ejemplo, es una labor manual particularmente desagradable, en especial en su primera etapa ya que en ella se utilizan discos abrasivos para eliminar rebabas y rebosaderos de la fundición. Esta labor puede delegarse a un robot industrial el cual, con su fuerza superior, tiene la ventaja sobre el operador humano de poder manejar herramientas de mucha mayor potencia y peso. Por ejemplo, en las operaciones de desbastado con robots es común utilizar discos de corte con una potencia de 35 kW y diámetros de 760 mm (McCormack y Godding, 1983). En algunas de estas operaciones de maquinado y acabado, es mucho más conveniente y menos costoso que el robot presente las piezas de trabajo a la herramienta y no al contrario. Evidentemente, lo anterior no es viable si las piezas de trabajo son de gran tamaño, como en el caso del esmerilado de fundiciones pesadas o la perforación de orificios en placas de gran tamaño para la construcción de aviones, pero sí resulta ventajoso en situaciones en las que son necesarias un cierto número de operaciones donde cada una de ellas requiere una herramienta distinta para su ejecución.

En la mayoría de las operaciones de acabado hay cargas reactivas y las deformaciones resultantes en el brazo del robot son causa de imprecisión. Lo anterior puede evitarse recurriendo a procesos no reactivos como la perforación con rayo laser o el corte con flama. Sin embargo, este problema no puede evitarse en algunas operaciones como el esmerilado de desbaste, en las cuales es difícil saber cuándo se ha esmerilado lo suficiente. Se requieren sistemas de control adaptables para detectar los aumentos en la presión del esmeril y compensar automáticamente las variaciones en el programa del robot. La precisión de la colocación también es importante, particularmente en operaciones de terrajado y machueleado de roscas; en estos casos con frecuencia es necesario utilizar plantillas con perforaciones cónicas que funcionan como bujes. Estos dispositivos son en general esenciales cuando se utilizan actuadores hidráulicos, pero la mayor precisión de los robots animados con energía eléctrica con frecuencia elimina la necesidad de instalar las costosas plantillas.

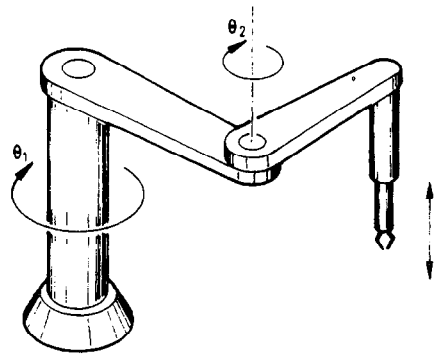
Otra área de aplicación que vale la pena mencionar es la de inspección y prueba. Los robots comienzan a utilizarse para desempañar labores de inspección y todavía queda mucho por hacer en este campo. En manufactura, por ejemplo, muchas características deben inspeccionarse para asegurar la calidad del producto sea del nivel que dictan los estándares. Estos estándares incluyen dimensiones, cantidad de defectos y forma. Para inspeccionar las dimensiones se recurre a dispositivos de medición con sensores neumáticos, inductivos, capacitivos, nucleónicos u ópticos. También se cuenta con máquinas de control numérico en la medición de coordenadas para realizar inspecciones dimensionales rápidas y precisas. Defectos como roturas y fallas pueden descubrirse por medio de dispositivos inductivos, ultrasónicos y de rayos X. Los robots pueden usarse para



llevar dichos dispositivos a la pieza de trabajo, o viceversa. En las células de manufactura, por ejemplo, es bastante común usar el robot para presentar las piezas de trabajo por turno a una serie de estaciones de operación que incluya inspección. Por otra parte, en las pruebas de fugas en los parabrisas de los automóviles, los robots se entrenan para seguir los bordes del parabrisas con los dispositivos de detección.

Algunos de los dispositivos de inspección dimensional mencionados anteriormente también pueden utilizarse para inspeccionar formas geométricas o características de las superficies, pero los principales avances en esta área dependen de la visión artificial por computadora. En la actualidad, el uso de la tecnología de televisión y computadora, hace posible enseñar a un robot a reconocer una forma específica. De esta manera, si al final de un proceso en particular un producto no tiene un orificio en el lugar adecuado, su forma no coincidirá con la de la plantilla almacenada en la memoria y el robot se puede enseñar a reaccionar enviando el producto a la charola de partes rechazadas.

El último uso por examinar en esta sección, y tal vez la que presente más dificultades para su puesta en práctica, es la de ensamble. Cuando los productos deben ensamblarse, ya sea que se trate de motores eléctricos, carburadores o tarjetas de circuitos impresos, existen tres opciones disponibles: ensamble manual, maquinaria especializada o robots. Anteriormente mencionamos que la maquinaria especializada (automatización fija) es rentable sólo cuando las corridas de producción son de gran tamaño, pero es interesante hacer notar que solamente alrededor de un 6 % de los productos ensamblados cae dentro de esta categoría. De esta forma, el ensamble es un área de producción con gran consumo de mano de obra y tiene una función preponderante en la determinación del costo final de un producto. De hecho, el costo del proceso de ensamble puede alcanzar hasta un 50 % del costo total de manufactura (Crossley y Lo, 1981). A la fecha,

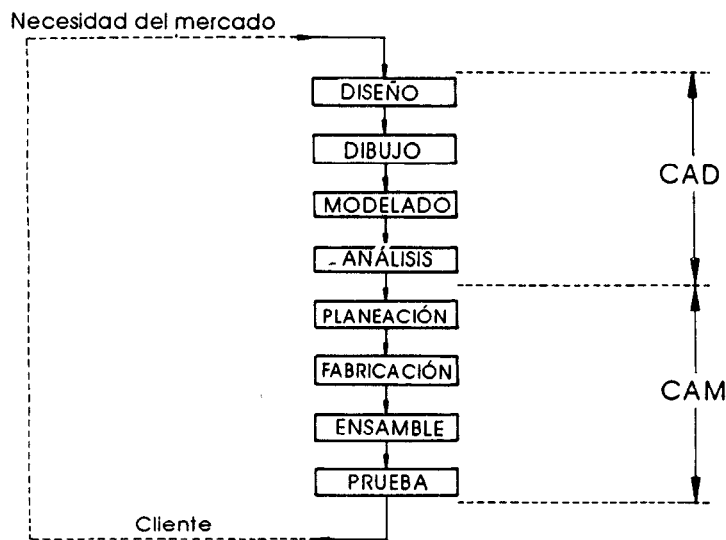


**Figura 1.10** La configuración tipo SCARA es útil para actividades de ensamble.

sin embargo, el número de robots que se utilizan en procesos de ensamble es relativamente reducido; esto se debe a la gran variedad de tareas que se tienen que hacer y debido a la necesidad de contar con un alto grado de precisión. Existe además la dificultad de competir contra la extraordinaria destreza del operador humano que puede seleccionar un componente de un recipiente donde las piezas no están ordenadas, alinearlos en forma adecuada, insertarlo y fijarlo en su sitio. Estas actividades presentan una gran dificultad al robot.

Afortunadamente, la mayoría de las actividades de ensamble son relativamente simples y necesitan operaciones de inserción vertical y de atornillado o prensado. En los trabajos iniciales llevados a cabo en el Laboratorio Charles Stark Draper del Instituto Tecnológico de Massachusetts se encontró que el 60 % de las partes se inserta desde una sola dirección, el 20 % desde la dirección opuesta, el 10 % a ángulos rectos a estas direcciones y sólo un 10% desde otras direcciones. Así, la principal operación en un proceso de ensamble consiste en tomar un componente con un movimiento vertical, moverlo en forma horizontal y después desplazarlo hacia abajo de nuevo en sentido vertical para insertarlo en su sitio. Lo anterior puede lograrse con un robot con tres grados de libertad, como el que se muestra en la figura 1.10.

Debido a la posibilidad de incurrir en un error en la alineación, es necesario incorporar un grado de cedencia al robot de ensamble. En el robot SCARA, cuya forma es similar a la que se muestra en la figura 1.10, ya se ha incorporado este grado de cedencia dado que el manipulador se mueve



**Figura 1.11** La empresa de manufactura total.

con motores de corriente directa cuyos pares de frenado pueden alcanzarse con los pares derivados de una mala alineación. Esta es una característica de gran utilidad exclusiva de la forma particular del robot SCARA. Cuando se emplean otras formas es necesario incorporar el grado de cedencia a la articulación. La existencia del grado de cedencia permite que el robot responda en forma pasiva a las fuerzas reactivas, aunque en la actualidad existen varios sistemas que pueden responder en forma activa, es decir, midiendo las fuerzas que hacen que el manipulador adopte una acción correctiva para asegurar que no sean excesivas. Además de este sentido táctil, estos robots para ensamble de la segunda generación se están equipando con visión artificial que les permita llevar a cabo tareas difíciles como la selección de artículos de charolas y el ensamble de tarjetas de circuitos impresos. La inclusión de la visión artificial elimina el equipo auxiliar requerido para orientar y ubicar los componentes de los robots de primera generación.

### ***Hacia la fábrica automatizada***

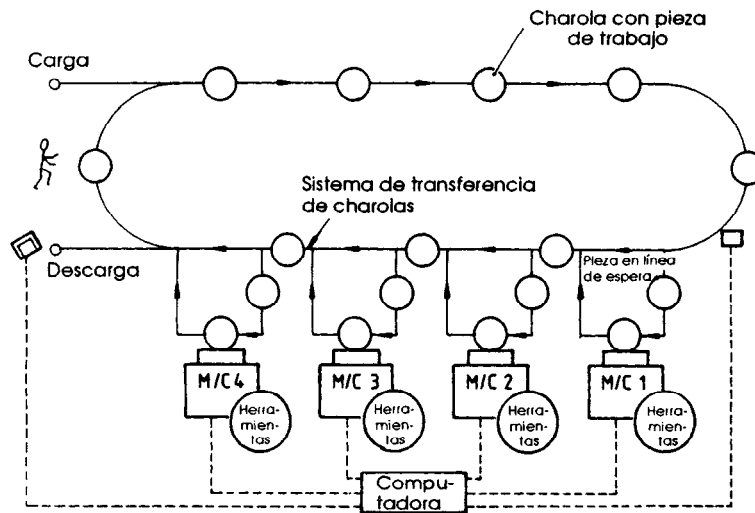
El ensamble automatizado es un paso hacia la fábrica automatizada en la cual las tres principales funciones, diseño, producción y administración, se integran mediante la computadora (Gunn, 1982). El objetivo consiste en organizar, programar y administrar toda la empresa de manufactura, desde el diseño del producto hasta su fabricación, distribución y servicio en campo. La habilidad de la computadora para almacenar datos y para comunicarlos hacia otras estaciones y desde éstas dentro de la fábrica, la convierten en parte central de la fábrica automatizada. Por ejemplo, la cadena de manufactura que se ilustra en forma simplificada en la figura 1.11, es en la actualidad complementada con frecuencia por medio del diseño mediante computadora (Computer-aided design, CAD) y la manufactura con ayuda de computadora (Computer-aided manufacturing, CAM). En el sentido más amplio, CAD se refiere a la aplicación de cualquier computadora al diseño, dibujo o elaboración de modelos incluyendo, por lo regular, alguna forma de uso interactivo de computadoras y pantallas gráficas (CAD/CAM, 1982, 1983). La potencia de la computadora también puede utilizarse para el análisis, por ejemplo, análisis de elementos finitos y análisis cinemático. El uso de la computadora permite que la información pueda almacenarse en una base de datos donde pueda utilizarse para determinar qué materiales se deben adquirir, qué partes deben sacarse de la bodega y qué instrucciones se deben dar a las máquinas de producción. Los datos geométricos almacenados también pueden usarse en otros programas como el paquete de análisis finito, el paquete de ilustración técnica y los paquetes de simulación. Estos datos establecen un puente entre CAD y CAM enfocado a la aplicación de las computadoras a los procesos de manufactura, para el control de la maquinaria, para el manejo de los datos

que describen los productos manufacturados y para el control y el manejo de los materiales que fluyen a través del sistema. El uso de datos numéricos basados en la computadora elimina la necesidad de dibujar una tarea que puede absorber hasta un 80 % del tiempo de diseño.

CAM ha progresado en forma constante a partir de las primeras máquinas de control numérico (NC) cuyas acciones se programaban con una cinta. Su introducción formó parte de la tendencia a incrementar la productividad, motivada al reconocer que en una máquina independiente operada en forma manual, sólo aproximadamente un 1.5 % del tiempo de la máquina se utiliza para el corte de metales en forma productiva (Carter, 1972). El resto del tiempo se consume en el cambio de herramientas, la carga, calibración y mantenimiento de la máquina y el tiempo que la máquina permanece inactiva. Las máquinas de control numérico eran capaces de producir hasta cinco veces más que sus equivalentes anteriores controladas en forma manual, pero el control numérico computarizado (CNC), en el cual las entradas por cinta de papel se sustituyeron por programas almacenados en una computadora, promete aún mayores aumentos de productividad. Este sistema tiene mayor flexibilidad que los NC dado que los programas pueden editarse fácilmente y pueden probarse realmente antes de utilizarlos mediante su simulación en una unidad de representación visual (VDU). Además, los programas relativos a distintos productos pueden solicitarse en forma aleatoria, permitiendo así que las máquinas manejen lotes distintos y reduciendo al mínimo el tiempo requerido para realizar modificaciones y preparar la máquina. Esta facilidad de programación hace que las máquinas CNC sean equivalentes a un robot; un robot diseñado especialmente para manejar herramientas.

La siguiente etapa en este proceso evolutivo fue la aparición del control numérico directo (Direct Numerical Control, DNC) mediante el cual una sola computadora supervisora podía controlar un cierto número de máquinas. Esto permitió reemplazar las computadoras de las máquinas CNC por una computadora de mayor tamaño que administraba un gran número de máquinas mediante tiempo compartido. En los sistemas DNC más sencillos, varias docenas de máquinas herramienta funcionan en forma completamente independiente y la carga y descarga de cada máquina se lleva a cabo en forma manual. El DNC flexible es más complejo, ya que las máquinas herramienta y un sistema automatizado para manejo de materiales se conectan y relacionan mediante una computadora de control. Un sistema como éste puede procesar artículos de diversas formas que requieren distintos procesos de maquinado. La célula de manufactura antes discutida (figura 1.8) es un ejemplo de este tipo de sistema, en el cual la función de manejo de materiales la lleva a cabo un robot.

En todos los casos y para todos los fines, los sistemas DNC flexibles pueden considerarse como sinónimos de sistemas de manufactura flexible (FMS), que son el último avance en el campo de la manufactura. Un sistema



**Figura 1.12** Un sistema de manufactura flexible.

de manufactura flexible puede definirse (Ranky, 1983) como un sistema dedicado a trabajar con datos de alto nivel y al flujo automático de materiales utilizando máquinas controladas por computadora, células de ensamble, robots industriales, máquinas de inspección y otros componentes, junto con sistemas integrados por computadora para el manejo de materiales y el almacenamiento. Se muestra un plano esquemático de un FMS en la figura 1.12 (CAD/CAM, 1983). La clave de estos sistemas es su flexibilidad. Distintos productos requieren diferentes operaciones de maquinado y éstas, a su vez, demandan tener la facilidad para cambiar la dirección del flujo de trabajo según se necesita. Ya se ha visto cómo el robot puede actuar como un dispositivo de transporte y manejo mecánico, pero en los sistemas de gran tamaño con frecuencia también es necesario usar vehículos guiados automáticamente, ya sea por medio de cables enterrados o a control remoto. La similitud de los sistemas de control de las máquinas de control numérico, los robots y los vehículos guiados automáticamente hace posible que una misma computadora central supervise toda la operación.

En la actualidad existen aproximadamente 80 sistemas de manufactura flexible en aplicaciones comerciales a nivel mundial. Uno de los sistemas que más llama la atención pertenece a *Fanuc*, que es uno de los más grandes fabricantes de maquinaria industrial, incluyendo tornos y robots, del Japón (Hartley, 1983). La fábrica incluye una bodega automatizada, un taller de maquinado, un taller de soldadura, un taller de inspección y un taller de ensamble. Carros robot que siguen las rutas marcadas por cables ocultos, transfieren las piezas de trabajo desde la bodega a los distintos talleres y nuevamente a la bodega. El sistema total es complejo, sólo el

taller de maquinado contiene 29 células, 7 de ellas utilizan tornos de control numérico por computadora para procesar partes con formas cilíndricas y 22 usan centros de maquinado con control numérico por computadora para dar formas prismáticas a otras partes. Los robots se emplean para transferir piezas de trabajo entre los tornos y las plataformas para transporte y almacenamiento.

### **1.10 Resumen**

En este capítulo se ha intentado delinear los orígenes y la evolución de los robots industriales, el epítome de la automatización. Comenzando a partir de máquinas relativamente lentas, que se aplicaban a la realización de actividades aburridas y poco placenteras, se ha avanzado rápidamente hacia una nueva generación de máquinas mucho más rápidas, que cuentan con una interacción sensible con su ambiente y que son capaces de llevar a cabo tareas delicadas de gran precisión como el ensamble. Con la introducción, de la programación fuera de línea, ya no es necesario imaginar al robot en forma aislada; su habilidad para comunicarse con otros sistemas computarizados, como es el caso de CAD, ha resultado en un número cada vez mayor de sistemas integrados, desde células de maquinado hasta sistemas de manufactura flexible. La siguiente etapa dentro de esta evolución, la tercera generación, sin duda dotará al robot con un cierto grado de inteligencia, inteligencia artificial, de manera que adquiera una mayor autonomía, junto con la capacidad de aprender con base en la experiencia y de reaccionar ante circunstancias imprevistas.

# Capítulo 2

## *Mecanismos y configuraciones para robots*

---

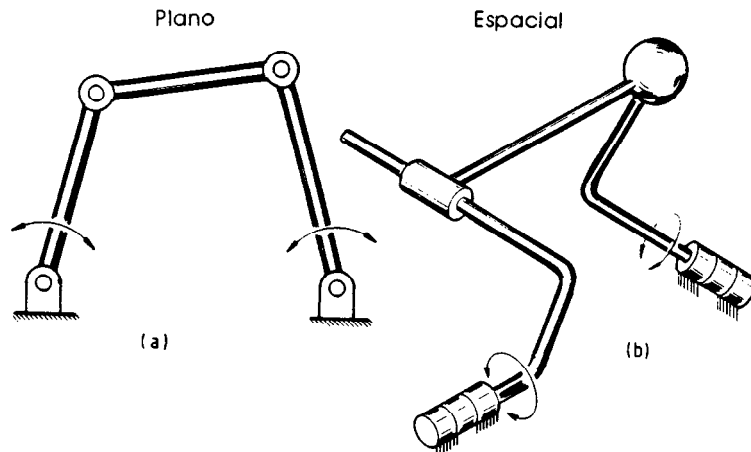
### 2.1 Introducción

En este capítulo se analizará la estructura del esqueleto del robot. Se mostrará cómo pueden usarse diversas configuraciones de tronco y brazos para colocar una muñeca en un punto en el espacio y cómo, a su vez, la muñeca puede colocar el efector final en una orientación angular particular. Se utilizarán métodos trigonométricos y matriciales para formular las relaciones entre los movimientos de las articulaciones del robot y la posición y la orientación de su efector final.

### 2.2 Mecanismos

Un mecanismo es un medio para transmitir, controlar o limitar movimientos relativos. En el mundo real siempre existe un cierto grado de elasticidad inherente en cada uno de los cuerpos integrantes, o eslabones dentro de un mecanismo, pero esto con frecuencia puede ignorarse, de modo que el mecanismo se puede tratar como un ensamble de eslabones rígidos conectados unos con otros por medio de articulaciones que permiten un movimiento relativo.

En la figura 2.1(a) se muestra un mecanismo planar en el cual el movimiento de los eslabones está restringido a un solo plano; en este caso, el plano del papel. El mecanismo aparenta tener solamente tres eslabones, pero en realidad existen cuatro, si se considera que el cuarto de estos enlaces está fijo en tierra. El diagrama en la figura 2.1(b) es un ejemplo de otra clase de mecanismo, el mecanismo espacial, cuyos diversos eslabones pueden moverse en diferentes direcciones en el espacio. Nuevamente, el ejemplo mostrado tiene cuatro eslabones, con uno de ellos fijo en tierra.



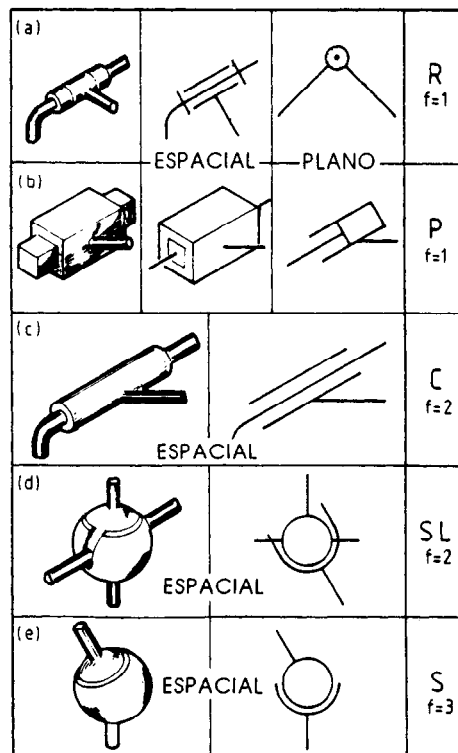
**Figura 2.1** Mecanismos: (a) plano, (b) espacial.

Las articulaciones que conectan los enlaces se conocen como *pares cinemáticos*. Como el nombre lo indica, un par tiene dos elementos, cada uno conectado a cada uno de los enlaces que une. Si dos elementos aparejados están en contacto superficial, se dice que forman un *par inferior*; si el contacto se da en un punto o a lo largo de una línea, el par se conoce como *par superior*. Por ejemplo, todas las articulaciones en la figura 2.1 son pares inferiores. Dos ejemplos de pares superiores son los engranes y las bielas. Cuando todas las articulaciones de un mecanismo son pares inferiores, comúnmente se le denomina *mecanismo*: de aquí que en la figura 2.1 se ilustren dos tipos.

El espacio disponible en el libro no permite incluir un análisis completo de todo los tipos de pares, por lo que será necesario limitarnos a los pares inferiores mostrados en la figura 2.2. El par (a) es un par giratorio o rotacional R. Permite solamente un movimiento relativo entre los dos enlaces, una rotación alrededor del eje del par. Es por esta razón que se dice que tiene un grado de libertad;  $f = 1$ . En la figura 2.2(b) se muestra un par deslizante o prismático P. Los elementos de un par P son prismas congruentes o cilindros no circulares. Tiene un grado de libertad translacional;  $f = 1$ . Los pares P y los pares R pueden usarse en mecanismos tanto planares como espaciales.

Los pares inferiores restantes de la figura 2.2 son de la variedad espacial. En la figura 2.2(c) se muestra un par cilíndrico o par C, consistente en dos cilindros circulares idénticos; uno de ellos convexo, el otro cóncavo. Los elementos pueden rotar uno respecto al otro sobre este eje. Como estos dos movimientos pueden existir en forma enteramente independiente, se dice que el par C tiene dos grados de libertad;  $f = 2$ . En la





**Figura 2.2** Pares: (a) rotacional, (b) prismático, (c) cilíndrico, (d) esférico ranurado, (e) esférico.

figura 2.2(d) se muestra otro par inferior con dos grados de libertad, pero en este caso ambos movimientos son giratorios. El par esférico ranurado o par SL consiste de una esfera convexa o sólida que, idealmente, coincide de manera exacta con una cubierta esférica del mismo radio. El perno y la ranura detienen la rotación relativa sobre el eje vertical. En la figura 2.2(e), por otra parte, no existe esta restricción y, por lo tanto, la articulación de bola o par esférico S tiene tres grados de libertad giratoria;  $f = 3$ .

Existen otros tipo de pares, como los de tornillo y los planares, pero la figura 2.2 nos brinda una variedad suficiente para cubrir nuestras necesidades en este libro. Nuestro objetivo es demostrar cómo afectan los pares los grados de libertad de un mecanismo y esto, a su vez, nos permitirá proponer una cierta variedad de configuraciones posibles para robots.

### **Síntesis numérica**

Se acaba de presentar el concepto de grados de libertad según se aplica a distintos tipos de pares. Otra forma de conceptualizar lo anterior consiste en definir el número de grados de libertad de un par como el número de

variables independientes que deben especificarse con el fin de ubicar cada uno de sus elementos con respecto de los otros. Este concepto puede ampliarse a una consideración del mecanismo completo. Los grados de libertad de un mecanismo con frecuencia se denominan *movilidad*. En forma análoga a los grados de libertad de un par, la movilidad se define como el número de variables independientes que deben especificarse con el fin de ubicar todos los miembros del mecanismo con respecto a los demás miembros (Hunt, 1978). Haciendo referencia nuevamente a la figura 2.1(a), un poco de atención permitirá confirmar que  $M = 1$ ; es decir, si solamente se conoce o está fijo uno de los ángulos entre los eslabones constituyentes, entonces todos los demás ángulos serán conocidos o estarán fijos.

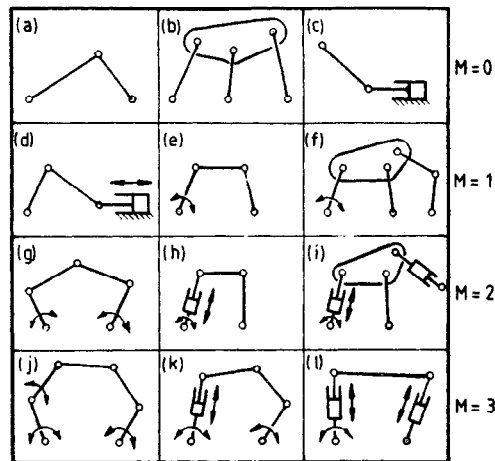
Esta técnica, conocida como síntesis numérica, nos permite determinar la movilidad de la mayoría de los mecanismos (aunque existen algunos casos especiales que requieren mayor cuidado). Para aplicar esta técnica debe primero reconocerse que un cuerpo rígido libre tiene seis grados de libertad: puede moverse sobre cualquiera de tres ejes ortonormales y puede rotar con respecto a cada uno de ellos. En otras palabras, deberán conocerse tres desplazamientos lineales y tres rotaciones angulares antes de que pueda definirse su posición en el espacio. De aquí que  $N$  cuerpos sin restricciones de movimiento tendrán  $6N$  grados de libertad. Ahora, con el fin de transformar estos cuerpos en un mecanismo, será necesario fijar uno de ellos en tierra y conectarlos por medio de pares. Ambas operaciones reducirán el número total de grados de libertad, o la movilidad, del mecanismo. Al fijar uno de los eslabones se eliminan seis grados de libertad: de aquí que la movilidad se reduzca a  $6(N - 1)$ . Además, cada par reduce la movilidad en  $(6 - f)$ , en donde  $f$  es el número de grados de libertad del par en particular. Por ejemplo, el par S tiene  $f = 3$ , por lo que cuando se usa para conectar dos eslabones, elimina tres grados de libertad de los eslabones conectados; es decir, uno de ellos ha perdido sus tres grados de libertad de translación. De esta forma, con  $G$  pares en total, la movilidad  $M$  se transforma en

$$M = 6(N - 1) - \sum_{i=1}^G (6 - f_i) \quad (2.1)$$

en donde  $f_i$  es el número de grados de libertad del  $i$ ésimo par, o bien,

$$M = 6(N - G - 1) + \sum_{i=1}^G f_i \quad (2.2)$$

Con frecuencia, esta ecuación se atribuye a Grübler.



**Figura 2.3** Mecanismos con movibilidades  $M = 0, 1, 2$  y  $3$ .

Aplicaremos la ecuación al mecanismo espacial de la figura 2.1(b). Aquí  $N = 4$  y  $G = 4$ . Existen dos pares R, un par C y un par S, lo que da una libertad total en las articulaciones de  $2 + 2 + 3 = 7$ . Por lo tanto

$$M = 6(4 - 4 - 1) + 7 = 1$$

En el caso de los mecanismos planares, como el que se muestra en la figura 2.1(a), la ecuación anterior debe modificarse para tomar en cuenta el hecho de que un cuerpo rígido tiene tres, no seis, grados de libertad en un movimiento sobre un solo plano. El lector deberá verificar que la ecuación modificada queda como sigue

$$M = 3(N - G - 1) + \sum_{i=1}^G f_i \quad (2.3)$$

Comencemos por considerar los mecanismos mostrados en la figura 2.3. En el primer renglón se muestran tres mecanismos, cada uno de los cuales tiene cero movilidad. Por ejemplo, el mecanismo (b) tiene  $N = 5$  y  $G = 6$ . Debe notarse que uno de los mecanismos tiene tres pares acoplados a él; es por esta razón que se le conoce como enlace terciario. El resto son enlaces binarios. Para cada par R,  $f = 1$ . Por lo tanto

$$M = 3(5 - 6 - 1) + 6 = 0$$

Estas configuraciones no pueden emplearse como mecanismos, dado que no puede existir un movimiento relativo entre ninguno de los eslabones. Se trata en realidad de estructuras estáticamente determinadas.

En el segundo renglón de la figura 2.3 se muestra un conjunto de mecanismo con mayor utilidad. Aquí  $M = 1$  y es posible identificar una entrada que, una vez conocida, determina el valor de una salida. Por ejemplo, en el mecanismo (d) utilizando tres pares R y un par P, la entrada podría ser el desplazamiento del par P y la salida podría ser la rotación resultante del enlace del lado izquierdo. El mecanismo (e) ya se había presentado en la figura 2.1(a). El mecanismo (f) se ha incluido para demostrar que la adición del par de eslabones del lado derecho al mecanismo (e) no afecta la movilidad global. Este par de mecanismos, con sus tres pares R, se conoce como una *díada*. Un cálculo rápido confirma que su introducción no afecta la movilidad; existen dos enlaces adicionales, con lo que se añaden seis grados de libertad, pero existen tres pares R adicionales que eliminan los seis grados de libertad.

Los mecanismos (g), (h) e (i) tienen cada uno  $M = 2$ . Por ejemplo, (i) tiene  $M = 7$  y  $G = 8$ , incluyendo dos pares P y seis pares R. Por lo tanto,

$$M = 3(7 - 8 - 1) + 8 = 2$$

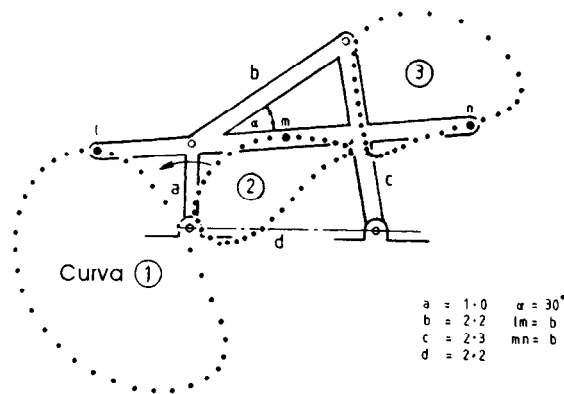
Para cada uno de estos tres casos, una salida depende de dos entradas. Debe hacer notar también otra forma de díada, mostrada en el mecanismo (i), que consiste en dos eslabones con dos pares R y un par P. Su adición a (h) no cambia su movilidad.

Finalmente, el último renglón muestra mecanismos con  $M = 3$ . El mecanismo (k) se ha generado a partir de (j) reemplazando la díada RRR del lado izquierdo por una díada RPR. El eslabón 1) reemplaza la díada RRR restante por otra díada RPR. De esta forma, las díadas pueden introducirse o intercambiarse sin afectar la movilidad de un mecanismo.

### **Curvas de acoplamiento**

Todo lo anterior puede estar muy bien pero ¿qué tiene que ver con los robots industriales? La respuesta es que los mecanismos están diseñados de manera que algún punto o eslabón en particular se mueva en una forma conocida en respuesta a órdenes de entrada conocidas. Esto es lo que cabría esperar del efector final de un robot industrial, el cual debe moverse en una forma particular en respuesta a ciertas entradas dadas.

Dentro de la cinemática de los mecanismos, el estudio del movimiento de un punto en particular de un eslabón cae dentro de la teoría de las curvas de acoplamiento (Hunt, 1978). El mecanismo plano de cuatro barras articulado se utiliza con frecuencia para descubrir ciertas trayectorias. Este mecanismo se mostró en su forma más elemental en la figura 2.1(a), pero debe hacerse notar que cada uno de los tres eslabones móviles puede extenderse indefinidamente a lo largo y sobre cualquiera de los lados de su línea central. Así, para cada configuración geométrica de los pares en



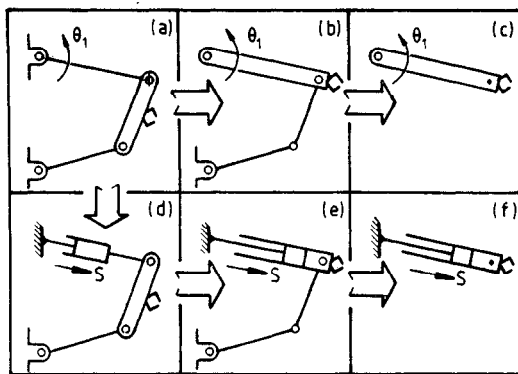
**Figura 2.4** Curvas de acoplamiento para un mecanismo de cuatro barras.

particular, existe un número infinito de diseños para mecanismos de cuatro barras. En la figura 2.4 se muestra una cadena de cuatro barras específica con los eslabones  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , y  $d$ . El eslabón  $b$ , el acoplador, se ha extendido y la figura muestra las trayectorias, o curvas de acoplamiento, determinadas por tres puntos diferentes,  $l$ ,  $m$  y  $n$  sobre el acoplador, conforme gira el enlace  $a$  a una velocidad constante. (Debe notarse que los eslabones  $a$  y  $c$  deben estar compensados para permitir que gire  $b$ . La distancia entre puntos sucesivos es una medida de la velocidad; un espacio más amplio indica una mayor velocidad).

El conocimiento de estas curvas es extremadamente útil para el diseñador de mecanismos. Por ejemplo, la curva 3) tiene un segmento recto y, por lo tanto, podría usarse para alimentar componentes a una máquina, o para hacer pasar una película a través de un proyector. La curva 1) imita hasta cierto punto el movimiento del pie y la pierna humanos y, como se estudiará posteriormente (capítulo 3), esto permite su utilización en las máquinas andantes. Se han elaborado un gran número de mapas de curvas de acoplamiento para diferentes puntos de cientos de mecanismos planares (Hrones y Nelson, 1957).

### **Mecanismos de robot con $M = 1$**

El mecanismo de cuatro barras de la figura 2.4 tiene  $M = 1$ , por lo que existe una relación única entre la posición de un punto en el acoplador y la posición del eslabón de entrada. El hecho de que el punto de acoplamiento esté limitado a moverse sobre una trayectoria en particular, refleja la naturaleza de un solo grado de libertad del mecanismo. En la figura 2.5 se ilustra cómo esta propiedad puede utilizarse en robots elementales. Se muestran seis configuraciones diferentes, cada una de ellas con  $M = 1$  y cada una con un



**Figura 2.5** Seis manipuladores diferentes con un grado de libertad.

efector final acoplado a ella. En los casos (a), (b) y (c) la posición del efector final se determina en forma única con una entrada angular  $\theta$ . En (d), (e) y (f) la entrada es una traslación  $S$ .

Existe una evolución lógica a partir del mecanismo de cuatro barras en (a) hasta el mecanismo abierto de un mecanismo en (c). Primero, el efector final se mueve de la parte media del acoplador, en donde recorrería una trayectoria bastante complicada, hacia el extremo del eslabón de entrada, donde recorre un arco o, posiblemente, la circunferencia de un círculo. La configuración (c) se obtiene, entonces, al eliminar la díada de (b). Ahora, (c) resulta poco usual en el sentido de que, a diferencia de los otros, es un mecanismo abierto. Esto ilustra el hecho de que el concepto de la movilidad se aplica por igual a los mecanismos abiertos como a los mecanismos cerrados. Sin embargo, la ecuación (2.3) no podría aplicarse directamente al mecanismo abierto, pero su movilidad podría deducirse observando que es cinemáticamente equivalente a (b) o, simplemente, al restar las dos limitantes del par  $R$  único de los tres grados de libertad planares del eslabón sencillo. Esta observación no es simplemente pedantería: posteriormente se verá que, aun cuando (c) puede ser, con frecuencia, la selección más ortodoxa para el brazo de un robot, pueden existir otras ventajas si en cambio se emplean (a) o (b).

Las configuraciones (d), (e) y (f) también están relacionadas en forma lógica. El mecanismo (d) se obtiene a partir de (a) reemplazando un par  $R$  en (a) por un par  $P$ . La entrada en este caso es la traslación  $S$ . Cuando se elimina la díada de (e) se tiene otro mecanismo abierto básico con un grado de libertad. Esta vez, a diferencia de (c), la libertad es de tipo traslacional y el efector final se mueve en línea recta.

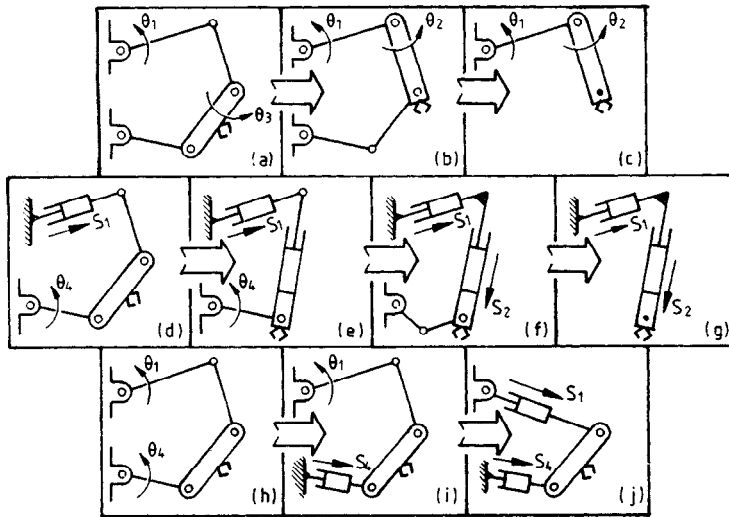


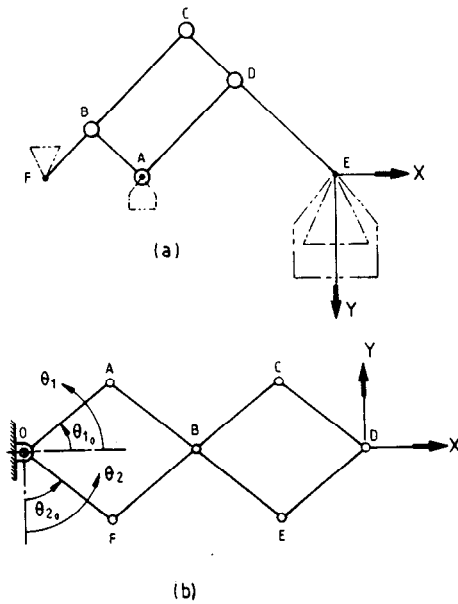
Figura 2.6 Manipuladores con dos grados de libertad.

### Mecanismos de robot con $M = 2$

Un robot con sólo un grado de libertad estaría severamente restringido: pasemos ahora a analizar mecanismos con  $M = 2$ . En la figura 2.6 se muestran diez variaciones, cada una de las cuales permite que el efector final se mueva hacia cualquier punto dentro de un espacio bidimensional limitado. Considérense primero las configuraciones (a), (b) y (c). En (a), dado que  $M = 2$ , se emplean dos entradas  $\theta_1$  y  $\theta_3$  para colocar el efector final. En (b),  $\theta_1$  y  $\theta_2$  se usan como entradas y (c) se deriva de (b) al eliminar la díada inferior. El mecanismo abierto de dos eslabones en (c) es un brazo de robot ortodoxo operado en serie.

El mecanismo (d) se deriva de (a) al reemplazar un par R por un par P. Entonces, si la díada RRR del lado derecho en (d) se reemplaza por una díada RPR se tendrá como resultado la configuración (e). La configuración (f) se obtiene al intercambiar libertades con el mecanismo (e): un par R se mueve de la parte superior a la parte inferior. La díada RRR resultante puede entonces eliminarse para dar la cadena abierta de dos eslabones (g) la cual, al igual que (c), es un medio ortodoxo para obtener dos grados de libertad en un robot, aunque los dos grados de libertad traslacionales se definen generalmente a  $90^\circ$  el uno del otro.

Por último (h), que es similar a (a) con la excepción de que se utiliza  $\theta_4$  como entrada en lugar de  $\theta_3$ , cambia a (i) cuando un par R se reemplaza por un par P. Al intercambiar la díada RRR en (i) por una díada RPR se obtiene la configuración (j), la cual al igual que (g) tiene dos

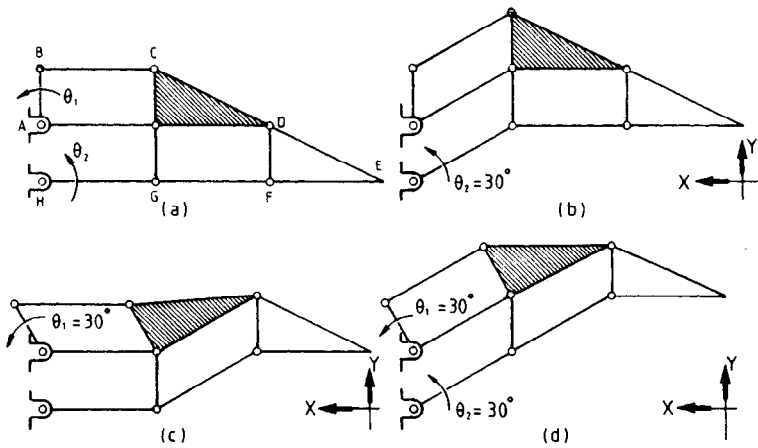


**Figura 2.7** Mecanismos de pantógrafo.

entradas de traslación, pero esta vez en paralelo y no en serie. Este modo de operación puede tener varias ventajas, por ejemplo, suministra una estructura más rígida que la configuración operada en serie, lo que conduce a una mayor precisión en la ubicación. Además, los actuadores pueden ubicarse cerca de la base; no es necesario cargarlos como en el caso de (c) y (g). Por lo tanto, la configuración puede ser ligera, lo que resulta en una mayor rapidez de respuesta.

La figura 2.6 no es un catálogo completo de las distintas maneras de guiar un efector final en un espacio bidimensional. Se han logrado diversos avances recientes, algunos de ellos basados en el pantógrafo. El mecanismo de pantógrafo se usa para aumentar o reducir el tamaño de una figura dibujada en un plano. En la figura 2.7(a) se muestra un posible arreglo con  $FB = BA$  y  $BC = AD = DE$ . En este caso, si A es un punto fijo, el punto E invertirá y aumentará el movimiento del punto F en una cantidad igual a  $BC/BF$ . Si, por otro lado, F se emplea como el punto fijo y se deja a A en libertad de movimiento, entonces E amplificará el movimiento de A una cantidad  $(1 - BC/BF)$ . Este mecanismo permite el uso de actuadores lineales para ubicar el punto E en el plano X, Y. Si un actuador vertical se coloca en F y un actuador horizontal se coloca en A, entonces, para la posición deseada x, y de E, el actuador F tendrá que mover el punto F hacia arriba una distancia de  $y/(BC/BF)$  y el actuador A deberá mover el punto A hacia la derecha una distancia de  $x/(1 + BC/BF)$ . Más adelante se verá que es más fácil lograr el control con las coordenadas cartesianas que con otros





**Figura 2.8** El manipulador de eslabones en paralelo: (a) configuración inicial, (b) efecto de un cambio de  $30^\circ$  en  $\theta_2$ , (c) efecto de un cambio de  $30^\circ$  en  $\theta_1$ , (d) efecto combinado.

métodos, como el brazo articulado de la figura 2.6(c). En la figura 2.6(g) se muestra otra forma de lograr control en las coordenadas cartesianas, pero mientras que la figura 2.7(a) tiene actuadores fijos a tierra en los puntos A y F, uno de los actuadores en la figura 2.6(g) debe transportarse alrededor, aumentando así la masa en movimiento y reduciendo la velocidad de respuesta. El enlace de pantógrafo de la figura 2.7(a) se utiliza en robots comerciales (Hirone y Umetani, 1981) y en las máquinas andantes (Taguchi y colaboradores, 1976).

Otra configuración de pantógrafo se muestra en la figura 2.7(b). Esta configuración consiste en seis enlaces con  $OA = OF = CD = DE$  y  $AE = FC = 2OA$ . En este caso, las dos entradas de rotación  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , que operan en paralelo, se emplean para ubicar el punto D en el plano X, Y, en lugar de las entradas lineales de la figura 2.7(a). El movimiento del punto D es el doble del movimiento del punto B, mientras que el movimiento de B es la suma de los movimientos de los puntos A y F. Es este último hecho lo que hace que este mecanismo tenga gran utilidad. Si los valores iniciales de  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son  $\theta_{10}$  y  $\theta_{20}$ , definidos en la figura 2.7(b), es fácil demostrar que el movimiento de D se obtiene de

$$x = 2(OA)(\sin \theta_2 + \cos \theta_1 - \sin \theta_{20} + \cos \theta_{10}) \quad (2.4)$$

y

$$y = 2(OA)(\sin \theta_1 - \cos \theta_2 - (\sin \theta_{10} - \cos \theta_{20})) \quad (2.5)$$

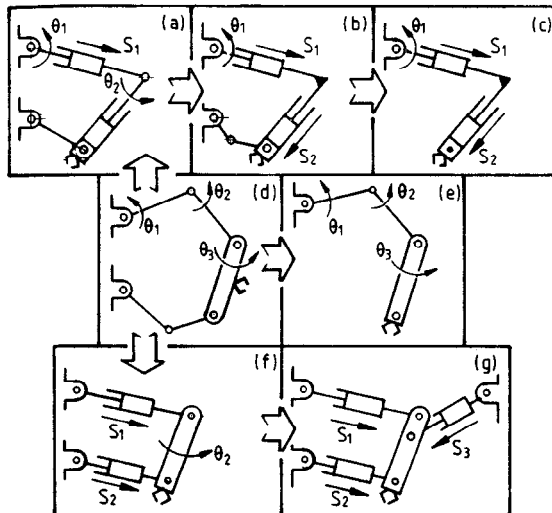
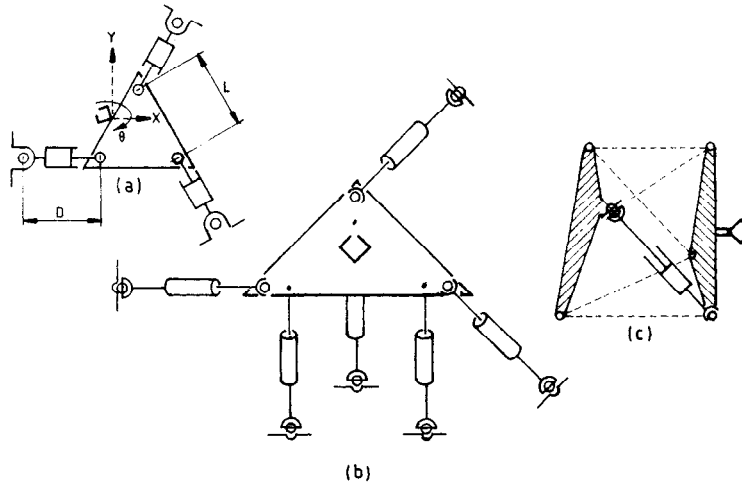


Figura 2.9 Mecanismos con movilidad  $M = 3$ .

Otro mecanismo con dos grados de libertad se muestra en la figura 2.8. El enlace ha sido descrito por Toyama y Takano (1981) como un mecanismo de tipo paralelo. En el caso mostrado, los enlaces  $BC$ ,  $AJ$ ,  $HG$ ,  $GF$  y  $FE$  son de igual longitud y  $AB = CJ = AH = DF = 0.5HG$ . Al igual que en la figura 2.7(b), se utilizan dos entradas rotatorias en paralelo  $\theta_1$  y  $\theta_2$  para controlar las coordenadas  $X, Y$  del punto  $E$ . En la figura 2.8(b) se muestra lo que sucede cuando  $HG$  se hace rotar  $30^\circ$  mientras  $AB$  se mantiene fijo ( $\theta_1 = 0$ ). Puede apreciarse que el movimiento de  $E$  es similar al de  $G$ . En la figura 2.8(c),  $HG$  está fijo ( $\theta_2 = 0$ ) y  $AB$  se hace rotar  $30^\circ$ . En este caso el movimiento de  $E$  es la mitad del movimiento de  $B$ . En la figura 2.8(d) se ilustra el resultado de combinar las rotaciones,  $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$  y se muestra que el movimiento de  $E$  es la suma de los movimientos en las figuras 2.8(b) y (c). Esta configuración en particular se elaboró en un intento por acelerar el movimiento de los brazos de un robot. El argumento es que tiene una mayor rigidez que los brazos de robot comunes y que son mínimos los pares de fuerzas requerido para mantener una carga estacionaria.

#### Mecanismos de robot con $M > 3$

Pasemos ahora a los sistemas con tres grados de libertad, pero por el momento nos restringiremos al movimiento sobre un solo plano. Sin embargo, el lector perspicaz notará que en todos los sistemas con dos grados de libertad analizados hasta ahora (figuras 2.6, 2.7 y 2.8) pudo



**Figura 2.10** Topología en paralelo: (a) tres grados de libertad, (b) seis grados de libertad, (c) una versión compacta de (b).

haberse añadido otro grado de libertad que permitiera la rotación alrededor de un eje vertical.

En la figura 2.9 se muestran varios mecanismos, cada uno de ellos con una movilidad de 3. Comenzando con el mecanismo (d), que ya se había presentado en la figura 2.3(j), puede verse que con tres entradas  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$  se puede controlar tanto la posición como la orientación del efector final. El mecanismo cerrado que se presenta en (d) puede transformarse en el mecanismo abierto (e) que es más común si se elimina la díada RRR inferior.

El mecanismo (a) también puede derivarse de (d), pero en este caso se reemplazan dos díadas RRR por díadas RPR. El mecanismo (b) se obtiene transfiriendo las libertades de (a). El mecanismo (c) se obtiene eliminando la díada RRR de (b).

Otra variante del mecanismo (d) puede lograrse al reemplazar las díadas RRR superior e inferior por díadas RPR como en (f). Para finalizar, (g) se obtiene al añadir una díada RPR a (f). Esto permite que todas las entradas sean traslacionales y estén en paralelo, en comparación con la naturaleza serial de los mecanismos (c) y (e).

Anteriormente se había mencionado que la operación en paralelo ofrece varias ventajas, como una mayor rigidez y rapidez de respuesta. Lo anterior ha conducido a un considerable interés en los sistemas en paralelo en especial para operaciones de ensamble. Muchas de las configuraciones propuestas se derivan de los primeros trabajos de Gough (1962) y Stewart (1965). Estos dos autores diseñaron y construyeron plataformas con seis grados de libertad; en el caso de Gough, para probar llantas y en el caso de Stewart, para simulación de aeronaves.

Con el fin de entender la operación de estos sistemas, comencemos por examinar un sistema con tres grados de libertad. El mecanismo mostrado en la figura 2.9(g) es un buen punto de partida; este mecanismo se muestra en una configuración más simétrica en la figura 2.10(a). Si la configuración mostrada se toma como posición de referencia, entonces, por ejemplo, las extensiones requeridas del actuador del lado izquierdo para una posición dada  $(x,y)$  y la orientación  $\theta$  del efector final son

$$\{[x + D + 0.25L - 0.5L \cos(60 - \theta)]^2 + [y + 0.433L - 0.5L \sin(60 - \theta)]^2\}^{0.5} - D \quad (2.6)$$

Pueden deducirse expresiones similares para las extensiones requeridas para los otros dos actuadores. Regresaremos a esta ecuación después de analizar las técnicas para determinar los movimientos de los actuadores para sistemas operados en serie.

La movilidad de este sistema puede aumentarse de 3 a 6 mediante la introducción de otros tres actuadores lineales (o pares prismáticos), uno de ellos colocado de manera vertical en cada esquina de la plataforma (figura 2.10(b)). Tenemos ahora un mecanismo espacial que permite la ubicación del efector final en  $x, y, z$ , con orientaciones específicas con respecto a cada uno de los tres ejes  $X, Y$  y  $Z$ . Se emplean pares esféricos  $S$  para conectar los actuadores a la plataforma, mientras que se utilizan pares  $SL$  (articulaciones en dos ejes) para conectar los actuadores a tierra. (La alineación de estos pares  $SL$  debe considerarse cuidadosamente).

La movilidad puede verificarse usando la ecuación (2.2):

$$M = 6(N - G - 1) + \sum_{i=1}^G f_i$$

Aquí,  $N = 14$  y  $G = 18$ . De los 18 pares inferiores, existen seis pares  $S$  cada uno con  $f = 3$ , seis pares  $SL$  cada uno con  $f = 2$  y seis pares  $P$  cada uno con  $f = 1$ . Por lo tanto,

$$\begin{aligned} M &= 6(14 - 18 - 1) + (6 \times 3) + (6 \times 2) + (6 \times 1) \\ &= -30 + 36 \\ &= 6 \end{aligned}$$

Se han propuesto algunas versiones más compactas de esta configuración (Hunt, 1978; 1982) siendo una de ellas la que se presenta en la figura 2.10(c) donde, para una mayor claridad, se muestra solamente uno de los seis actuadores lineales.

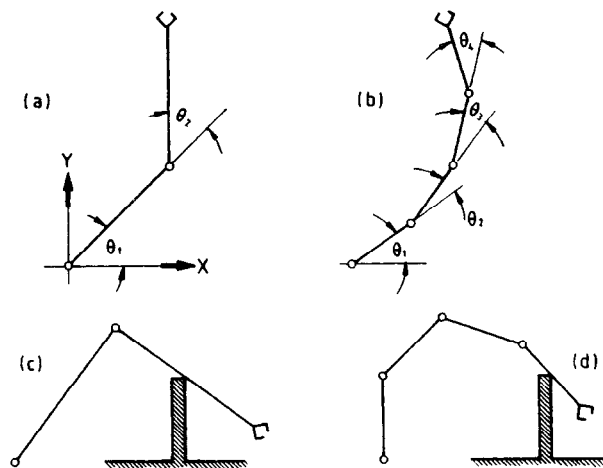
En este caso se consiguieron seis grados de libertad al mover la plataforma como un todo. Sin embargo, en la mayoría de los robots comunes, los seis grados de libertad se distribuyen entre el brazo y la mano del robot. Básicamente, el brazo ubica la muñeca en el espacio tridimensional y la muñeca a su vez determina la orientación de la mano respecto a tres ejes ortonormales.

### Mecanismos de robot con $M > 6$

Una situación interesante se presenta cuando el número de grados de libertad de un mecanismo robot (su movilidad) excede el número máximo de 6 requerido por un efector final. ¿Qué uso pueden tener estos mecanismos con movibilidades tan grandes? La respuesta es obvia: son extremadamente móviles y, por lo tanto, pueden tener acceso a lugares que de otra forma resultarían inaccesibles para robots con menores movibilidades.

Sin embargo, cuando  $M > 6$  existen demasiadas incógnitas en las ecuaciones cinemáticas y se presenta un problema de redundancia matemática. Lo anterior puede explicarse haciendo referencia al caso más simple de  $M = 2$  mostrado en la figura 2.11(a), en donde el efector final requiere dos grados de libertad de manera que pueda ubicarse en cualquier punto sobre el plano  $XY$ . El mecanismo abierto de la figura 2.11(a) tiene  $M = 2$  y puede, por lo tanto, suministrar estos grados de libertad. Pueden establecerse dos ecuaciones para relacionar  $\theta_1$  y  $\theta_2$  con  $x$  e  $y$ , y dadas  $x$  e  $y$ , estas incógnitas pueden resolverse para obtener el  $\theta_1$  y  $\theta_2$ .

El mecanismo abierto de la figura 2.11(b) tiene  $M = 4$ , pero aun cuando ahora existen cuatro variables, el número de ecuaciones sigue



**Figura 2.11** Maniobrabilidad: (a) dos grados de libertad, (b) libertades simuladas, (c) grados de libertad auxiliares y (d) la maniobrabilidad aumenta.

siendo de dos; una para  $x$  y otra para  $y$ . Por lo tanto, para un par  $x$  e  $y$  dado existe un número infinito de soluciones para los ángulos  $\theta_1$  a  $\theta_4$ . Sin embargo, esta indeterminación puede evitarse y de modo que se mantengan algunas de las ventajas de una mayor movilidad, mediante la introducción del concepto de grados de libertad auxiliares. Por ejemplo, si  $\theta_2$  se limitara a ser igual a  $K\theta_1$  y  $\theta_4$  a ser igual a  $K\theta_3$ , entonces  $\theta_2$  y  $\theta_4$  serían grados de libertad auxiliares. Su uso, aun cuando no aumenta la movilidad, puede dar pie a un útil aumento en la maniobrabilidad de un robot. Lo anterior se ilustra en las figuras 2.11(c) y (d) en las que se muestra un brazo de robot que intenta pasar un obstáculo. En (c) el brazo tiene  $M = 2$ . En (d) cada enlace tiene la mitad de la longitud de los enlaces correspondientes en (c), pero se han introducido grados de libertad auxiliares en la segunda y cuarta articulaciones. Aquí  $\theta_2 = 0.5\theta_1$  y  $\theta_4 = 0.5\theta_3$ . Puede verse claramente que (d) es más maniobrable que (c).

### 2.3 Cadenas simples $M = 3$

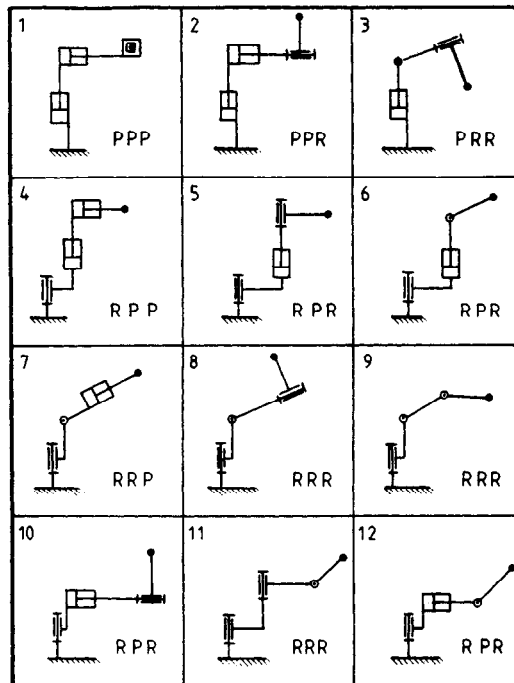
En las figuras 2.6, 2.7 y 2.8 se muestran 13 formas de obtener dos grados de libertad, pero existen muchas más. Sin embargo, debe hacerse notar que cualquiera de estas configuraciones podría transformarse en un sistema con tres grados de libertad permitiendo su rotación sobre un eje vertical. Por ejemplo, el sistema en la figura 2.6(c), que es antropomórfico en cuanto a que se asemeja al brazo humano, puede describirse como un sistema RR, dado que utiliza dos articulaciones rotacionales. La libertad para girar sobre un eje vertical, o tronco, convertiría el anterior en un sistema RRR como el que se muestra en la figura 2.12, variante 9. La figura 2.12 es una compilación de los principales mecanismos de robot con tres grados de libertad realizada por Milenkovic y Huang (1983). En esta figura no se incluye ninguno de los mecanismos cerrados de la figura 2.6. Se ha restringido a mostrar sólo las cadenas simples, definidas como mecanismos abiertos que emplean únicamente pares giratorios o prismáticos, estando los ejes del par ya sea perpendiculares o paralelos uno con respecto al otro.

En total existen 36 combinaciones posibles de estas cadenas simples de tres pares. De ellas, nueve degeneran en solamente uno o dos grados de libertad, por ejemplo, tres pares P paralelos uno con respecto al otro pueden producir traslación sólo en una sola dirección. De las 27 posibilidades restantes, siete son planares, por ejemplo, tres pares R paralelos uno con respecto al otro pueden producir sólo un movimiento planar (véase la figura 2.9(e)). Lo anterior deja 20 cadenas espaciales simples posibles. Pero incluso éstas pueden refinarse adicionalmente, dado que existen ciertas configuraciones en las cuales el orden de los pares no afecta el movimiento del brazo. Por ejemplo, considérese la variante 4 en la figura 2.12. Esta variante se conoce como robot cilíndrico. No resulta ningún

cambio en el movimiento del brazo si el par P precede al par R o si el par P vertical sigue al par P horizontal. La eliminación de todos estos mecanismos equivalentes reduce el número total de opciones a 12, como se muestra en la figura 2.12. En donde existen equivalentes, se ha seleccionado el mecanismo representativo del grupo como aquél donde el par P que es paralelo a un par R se encuentra en la parte media, como en la variante 4. ¿Puede usted detectar los otros?

Lo anterior ofrece al diseñador una amplia variedad de posibilidades. A la fecha, sin embargo, solamente cuatro de las configuraciones que se muestran en la figura 2.12 tiene una utilización más extensa. La variante 1 se conoce como configuración XYZ o *cartesiana*; la variante 4 como configuración *cilíndrica*; la variante 7 como configuración *polar* o *esférica* y la variante 9 como configuración de *brazo articulado* o *revolvente*. Al analizar la figura 2.13 resultarán evidentes las razones para haberles asignado estos nombres.

En la figura 2.13(a) se muestra una vista de elevación lateral y de planta de un robot cartesiano. Los tres actuadores son lineales y los movimientos se llevan a cabo sobre los ejes X, Y y Z. El área sombreada ilustra la extensión de la zona de trabajo, un cuboide en este caso. En la

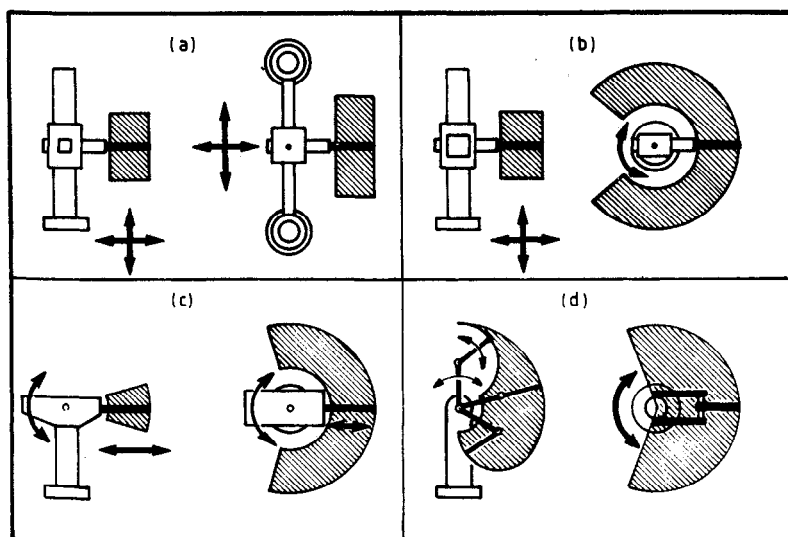


**Figura 2.12** Los tres principales grados de libertad en mecanismos de robot (Milenkovic y Huang 1983).

figura 2.13(b) se ilustra un robot cilíndrico. La zona de trabajo es un segmento de un cilindro y cualquier punto dentro de esa zona se define en términos de sus coordenadas cilíndricas, es decir, una posición axial, una posición radial y un ángulo. Por otra parte, en la figura 2.13(c) se muestra un robot que opera en coordenadas polares. Su zona de trabajo es una porción de esfera (de ahí su nombre común) y los puntos dentro de la zona de trabajo se definen por medio de coordenadas polares, es decir, una posición radial y dos ángulos.

Por último, la figura 2.13(d) es un esquema de un robot de brazo articulado, una configuración antropomórfica que se asemeja al tronco y brazo humanos. En este caso, la zona de trabajo es de nuevo una porción de esfera.

Resulta difícil generalizar al realizar comparaciones entre estas distintas configuraciones: la selección de alguna de ellas en general la determina la aplicación en particular. Sin embargo, puede decirse que, en términos generales, la zona de trabajo mejora conforme se avanza de (a) a (d). En (d) por ejemplo, es posible colocar el efector final más cerca de la base o lograr que trabaje a una mayor distancia. Esto permite que el brazo articulado pueda manipular dentro de un recipiente y salvar obstáculos. La facilidad en el control, sin embargo, tiende a ir en el otro sentido siendo mejor en el caso de (a) y peor en el caso de (d). En el robot cartesiano, por ejemplo, los movimientos pueden llevarse a cabo sobre cualquiera de los ejes sin afectar la orientación angular del efector final. Este no es el caso con el robot esférico, en donde la rotación sobre el eje Z podría cambiar la



**Figura 2.13** Las cuatro configuraciones más comunes: (a) cartesiana, (b) cilíndrica, (c) esférica, (d) brazo articulado.



orientación del efector final con respecto a los ejes X e Y. Pueden existir ocasiones en donde lo anterior resulte inaceptable y los circuitos de control tengan que proveer movimientos de compensación a los motores del efector final. Este problema es todavía más severo para la configuración polar con sus dos rotaciones. Y todavía es peor en el caso del brazo articulado en donde el problema se agrava por el hecho de que incluso un movimiento en línea recta sobre un solo eje requiere un movimiento coordinado de las articulaciones del codo y el hombro.

La precisión del robot también está afectada por su configuración. Más adelante se verá que la mayoría de los robots operan como sistemas de malla cerrada, comparan la posición real de las diversas coordenadas de control con los valores deseados y adoptan acciones correctivas cuando se detecta un error. En la actualidad la posición real se determina por medio de una medición y la precisión final del sistema depende de la precisión de la medición. La resolución de un sistema de control se define como el menor cambio en posición que el dispositivo de retroalimentación puede detectar. Por ejemplo, con frecuencia se emplea un codificador óptico para medir la posición en una máquina herramienta. Este tipo de codificador, que emite 1 000 pulsos de potencial por revolución, puede acoplarse a un tornillo guía con un paso de 10 mm sobre la mesa de una máquina herramienta y el codificador podrá entonces emitir un pulso por cada  $10/1000 = 0.01$  mm de desplazamiento de la mesa. Así, la resolución de control será de 0.01 mm.

Debe poderse apreciar que, debido a sus movimientos lineales, la configuración cartesiana es capaz de una resolución del mismo orden que el que se considera en los últimos avances de las máquinas herramienta (0.01 mm) y que esta resolución podrá mantenerse en todo el volumen de trabajo.

Esta última propiedad no puede mantenerse cuando una configuración utiliza un movimiento de rotación. Considérese el robot cilíndrico de la figura 2.13(b) e imagínese que se usara un codificador óptico para determinar la rotación angular sobre el tronco vertical. Si el codificador emitiera 1 000 pulsos por revolución entonces la resolución angular sería de  $360/1000 = 0.36^\circ$ . Esto ofrece aparentemente una precisión razonable si sólo se estuviera tratando de controlar la rotación angular.

Pero el objetivo es controlar la posición del extremo del brazo y si éste fuera normalmente de 1 metro de largo, la resolución de posición de su extremo sería de  $1\,000 \times 0.36 \times \pi/180 = 6.28$  mm. Este valor es muchas veces más grande que el valor esperado de una máquina herramienta.

Un problema similar se presenta en el caso del robot esférico, donde, mientras que el movimiento lineal puede controlarse con precisión, los cambios de posición causados por los movimientos angulares pueden presentar resoluciones muy pobres.

El robot de brazo articulado, con sus tres movimientos de rotación, es el peor de todos en este aspecto. Y, además, su estructura articulada permite que se acumulen los errores de la articulación.

Así, en resumen, la complejidad del control tiende a aumentar al pasar del robot (a) al robot (d). También tienden a aumentar los problemas de precisión, debido a la gran elasticidad de los materiales y a la pobre resolución. Por otra parte, la velocidad del movimiento del efector final tiende a aumentar al ir de (a) a (d) y mejoran tanto la magnitud del volumen de trabajo como su accesibilidad.

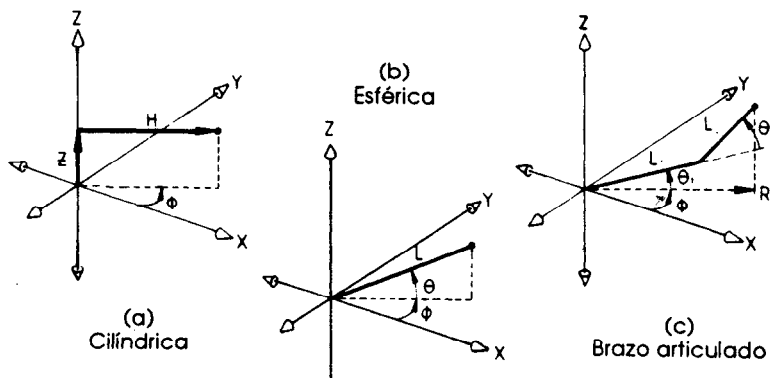
## 2.4 Forma de las cadenas simples

La forma de las configuraciones básicas se muestra en mayor detalle en la figura 2.14. (No se muestra el robot cartesiano debido a su sencillez). Para el robot cilíndrico,  $H$  y  $z$  son las entradas lineales y  $\phi$  la entrada de rotación.

Por lo tanto, las coordenadas del efector final son

$$\left. \begin{aligned} x &= H \cos \phi \\ y &= H \sin \phi \\ z &= z \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

En el caso del robot esférico  $\theta$  y  $\phi$  son las entradas de rotación y  $L$  la entrada lineal. Por lo tanto, de la figura 2.14(b),



**Figura 2.14** Forma geométrica de manipuladores (a) cilíndricos, (b) esféricos y (c) de brazo articulado.

$$\left. \begin{aligned} x &= L \cos \theta \cos \phi \\ x &= L \cos \theta \sin \phi \\ z &= L \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

En el robot de brazo articulado, las entradas  $\phi$ ,  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son de rotación. Por lo tanto

$$\left. \begin{aligned} x &= \{L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2)\} \cos \phi \\ y &= \{L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2)\} \sin \phi \\ z &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

La complejidad cada vez mayor de estas ecuaciones confirma nuestra aseveración anterior de que los problemas de control son más difíciles conforme se pasa de la configuración cartesiana a la configuración del brazo articulado. Analicemos lo anterior en mayor detalle.

### **El problema inverso**

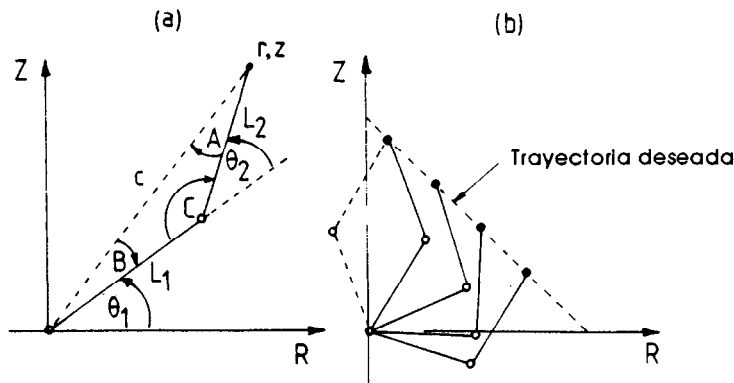
Dadas las coordenadas de una máquina  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $z$ ,  $L$ ,  $H$ , las ecuaciones (2.7) a (2.9) pueden usarse para determinar las coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$  del efector en el 'mundo real'. En muchos casos, sin embargo, es necesario resolver el problema inverso: dadas las coordenadas reales de un objeto o pieza de trabajo, se desea conocer las coordenadas referidas a la máquina requeridas para llevar al efector final a ese punto del espacio en particular. En el caso del robot cartesiano, lo anterior puede llevarse a cabo en forma directa dado que las coordenadas reales son idénticas a las coordenadas referidas a la máquina. Este problema se torna progresivamente más difícil conforme se avanza hacia el robot de brazo articulado.

Para el robot cilíndrico, las coordenadas referidas a la máquina o, simplemente, las coordenadas de la máquina son

$$\left. \begin{aligned} H &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ z &= z \\ \phi &= \tan^{-1} (y / x) \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Para el robot esférico son

$$\left. \begin{aligned} L &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \theta &= \tan^{-1} (z / \sqrt{x^2 + y^2}) \\ \phi &= \tan^{-1} (x / y) \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$



**Figura 2.15** Resolución del problema inverso para un robot de brazo articulado.  
 (a) la forma geométrica en el plano del brazo,  
 (b) coordenadas máquina para una trayectoria deseada.

La transformación inversa es más difícil en el caso del robot de brazo articulado y será necesario apoyarse en la figura 2.15(a) en la cual se muestra un robot de brazo articulado visto de acuerdo al plano del brazo (véase la figura 2.14(c)).

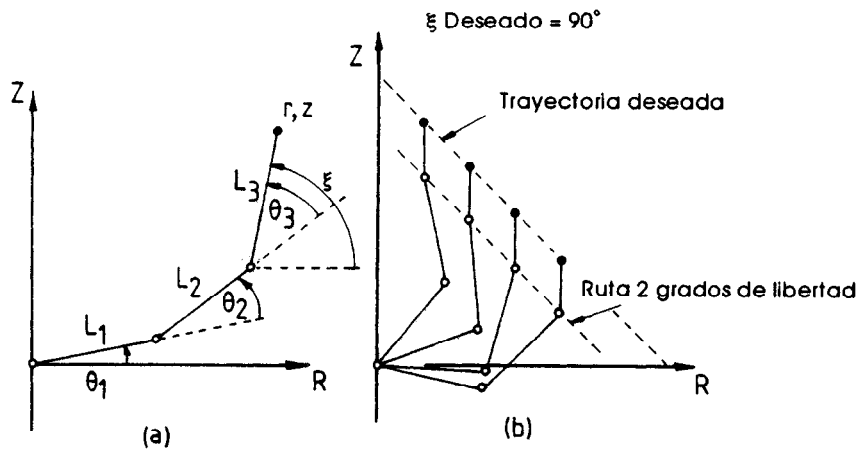
Pueden identificarse varias relaciones trigonométricas

$$\left. \begin{aligned}
 \phi &= \tan^{-1} (y/x) \\
 r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\
 c &= \sqrt{r^2 + z^2} \\
 A &= \cos^{-1} [(L_2^2 + c^2 - L_1^2)/2L_2c] \\
 B &= \sin^{-1} [(L_2/L_1) \sin A] \\
 \theta_1 &= \tan^{-1} (z/r) - B \\
 \theta_2 &= A + B
 \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Por lo tanto, para un conjunto dado de coordenadas reales estas fórmulas pueden aplicarse en forma secuencial para determinar las coordenadas máquina  $\phi$ ,  $\theta_1$  y  $\theta_2$ .

Los resultados de efectuar estos cálculos se muestran en la figura 2.15(b). Se supone que la trayectoria deseada del efector final es una línea recta en el plano  $z, r$ . Las coordenadas de la máquina, y las configuraciones de brazo resultantes se muestran para cuatro puntos sobre esta trayectoria. Para cada configuración existe una opción a elegir y una de ellas se muestra por medio de una línea discontinua.

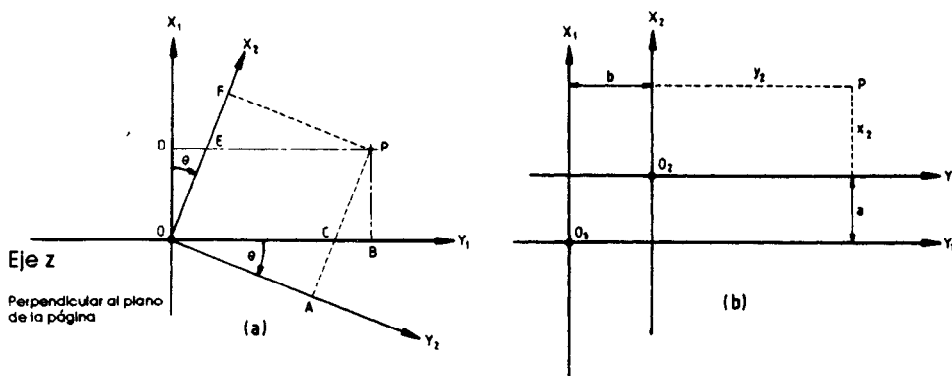
Los sistemas presentados en las figuras 2.14 y 2.15 proveen el control de tres grados de libertad, permitiendo que el efector final se ubique



**Figura 2.16** Resolución del problema inverso para los tres grados de libertad: (a) la forma geométrica que muestra el ángulo  $\xi$  de giro, (b) coordenadas máquina para una ruta y orientación deseadas.

en un espacio tridimensional. Pero un robot versátil requiere seis grados de libertad, de manera que tanto la posición como la orientación puedan controlarse. Veamos ahora cómo aumenta la complejidad del problema inverso conforme el número de grados de libertad se incrementa de 3 a 4.

En la figura 2.16(a) se muestra un brazo articulado con tres elementos  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ . Representa un brazo articulado al cual se ha agregado una muñeca con un solo grado de libertad, es decir, la muñeca puede girar solamente en el mismo plano que el brazo. El efector final, o dedos, se encuentra a una distancia  $L_3$  de la muñeca. Ahora, este grado de libertad adicional permite que el efector final se ubique en un punto  $r, z$  en el espacio y con una orientación específica  $\xi$  en el plano  $r, z$ .



**Figura 2.17** Transformaciones: (a) rotación de un sistema referencial, (b) traslación de un sistema referencial.

Al conocer la orientación  $\xi$  y la longitud  $L_3$  es posible determinar la posición requerida de la muñeca  $r_w, z_w$ . De la figura 2.15(a),

$$\left. \begin{aligned} z_w &= z - L_3 \sin \xi \\ r_w &= r - L_3 \cos \xi \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Al conocer estas coordenadas, se puede usar la ecuación (2.12) para determinar,  $\phi$ ,  $\theta_1$  y  $\theta_2$ . En la figura 2.17(b) se presentan los resultados de estos cálculos para el caso  $L_1 = L_2 = 2L_3$  y  $\xi = 90^\circ$ . De nuevo, como en el caso de la figura 2.16(b) se nota que existen dos arreglos posibles para el brazo superior e inferior para cada posición de la muñeca.

## 2.5 Métodos matriciales

La complejidad aumenta rápidamente con el número de grados de libertad. Para seis grados de libertad, incluso la transformación directa de coordenadas de la máquina a coordenadas reales, que se considera la más sencilla, puede resultar extremadamente compleja. El problema inverso puede requerir una cantidad considerable de cálculos y requiere que el analista aplique su intuición para la resolución de muchos de sus subproblemas, como decidir cuál de varias configuraciones geométricas posibles seleccionar. (Véase figura 2.15(b)).

El conocimiento de los métodos matriciales es deseable si se desea entender por completo la cinemática de los robots, en particular de los más complejos. Cuando la forma geométrica del manipulador es simple, se ha demostrado que se puede contar con una solución trigonométrica, pero en muchos casos la solución trigonométrica resulta demasiado difícil de aplicar a una configuración con los seis grados de libertad.

Al usar los métodos matriciales (Paul, 1982), el primer paso consiste en fijar sistemas de coordenadas a cada eslabón del manipulador, de manera que cada sistema de coordenadas tenga movimientos de rotación y traslación sobre su eslabón. Si las coordenadas cartesianas de un punto en un eslabón se conocen con respecto a su propio sistema de coordenadas, digamos las del efector final, entonces se pueden emplear matrices de transformación para modificar las coordenadas en relación con cualquier otro sistema. Así, a través de una serie de transformaciones, dependiendo del número de eslabones, se podrán obtener las coordenadas reales de cualquier punto de la cadena.

### Transformaciones

Examinemos algunos ejemplos de transformaciones de sistemas y sus matrices de transformación relevantes: en primer lugar, una rotación de un sistema referencial XYZ ortonormal sobre su eje Z. En la figura 2.17(a) se

muestra el sistema referencial en su posición original  $(XYZ)_1$  y en la posición  $(XYZ)_2$  después de una rotación positiva  $\theta$  alrededor del eje  $z$ . Las coordenadas de P en los dos sistemas están relacionadas por

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_2 \cos \theta - y_2 \sin \theta \\ y_1 &= x_2 \sin \theta + y_2 \cos \theta \\ z_1 &= z_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Estas relaciones pueden expresarse en una forma mucho más conveniente al utilizar una matriz de transformación homogénea. (Denavit y Hartenberg, 1955; Paul y colaboradores, 1981).

Las coordenadas homogéneas adoptan la forma  $(x, y, z, w)$  en donde  $x, y, z$  son las coordenadas cartesianas estándares y  $w$  es un factor de escala, que se considerará unitario en este capítulo. Usando esta terminología, la ecuación (2.14) puede escribirse como

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_2 \quad (2.15)$$

en donde  $C\theta = \cos \theta$  y  $S\theta = \sin \theta$ .

De manera similar, para una rotación positiva  $\alpha$  alrededor del eje X, es fácil mostrar (Paul, 1982) que

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha & 0 \\ 0 & S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_2 \quad (2.16)$$

y para una rotación positiva  $\phi$  sobre el eje Y

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_2 \quad (2.17)$$

Además de las rotaciones sobre un eje, también será necesario trabajar con las traslaciones de cuerpo de un sistema referencial con respecto a otro. Si el sistema referencial  $(XYZ)$  se mueve corporalmente una distancia  $a$  en la dirección  $x$  positiva,  $b$  en la dirección  $y$  positiva y  $c$  en la dirección  $z$  positiva, entonces puede escribirse

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_2 + a \\ y_1 &= y_2 + b \\ z_1 &= z_2 + c \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

En la figura 2.17(b) se ilustra lo anterior para el caso bidimensional ( $z = 0$ ).

La representación de la transformación homogénea será entonces

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_2 \quad (2.19)$$

Ahora estamos en posición de reconocer otra de las características de una matriz de transformación homogénea  $T$ . Puede escribirse en la forma general

$$T = \left| \begin{array}{ccc|c} & R & & P \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right| \quad (2.20)$$

en donde  $R$  denota el componente de rotación  $3 \times 3$  del sistema referencial 2 con respecto al sistema referencial 1 y  $P$  es un vector columna de 3 elementos que va del origen del sistema referencial 1 al origen de sistema referencial 2.

### Transformaciones combinadas

Es posible que todavía no sea obvio lo que todo esto tiene que ver con el comportamiento geométrico de los robots. La paciencia del lector pronto se verá recompensada, pero todavía existe otro aspecto del método matricial que debe entenderse: el de las transformaciones combinadas. Supóngase por ejemplo, que con respecto a su posición inicial  $(XYZ)_1$ , el sistema referencial ha sido rotado en forma positiva sobre  $Z$ , se ha trasladado un segmento  $(L, O, D)$  y, después, rotado en sentido positivo sobre el eje  $X$ . ¿Cuál es la transformación global resultante entre  $(XYZ)_1$  y  $(XYZ)_2$ ? La respuesta puede encontrarse al tomar las transformaciones individuales en la secuencia correcta; de aquí



$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_1 = (\text{rot } Z, \theta)(\text{tran } (L, O, D))(\text{rot } X, \alpha) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_2 \quad (2.21)$$

o bien,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha & 0 \\ 0 & S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_2$$

Al multiplicar las matrices se obtiene

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta C\alpha & S\theta S\alpha & LC\theta \\ S\theta & C\theta C\alpha & -C\theta S\alpha & LS\theta \\ 0 & S\alpha & C\alpha & D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_2 \quad (2.22)$$

o bien,

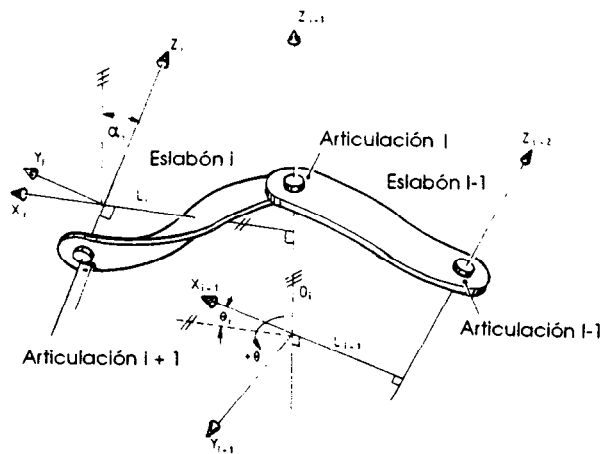
$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_2 C\theta - y_2 S\theta C\alpha + z_2 S\theta S\alpha + LC\theta \\ y_1 &= x_2 S\theta + y_2 C\theta C\alpha - z_2 C\theta S\alpha + LS\theta \\ z_1 &= y_2 S\alpha + z_2 C\alpha + D \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Por lo tanto, al conocer las coordenadas de un punto con respecto al sistema referencial  $(XYZ)_2$ , pueden determinarse sus coordenadas respecto al sistema referencial original  $(XYZ)_1$ . Debe recalcarse que el orden de los eventos es importante. Si el orden se cambia, la transformación global será distinta, dado que la multiplicación de matrices es un proceso no conmutativo.

### La matriz Denavit-Hartenberg

La matriz de transformación de la ecuación (2.22) ilustró el resultado de combinar movimientos de rotación y de traslación. Esta matriz tiene una importancia particular y se conoce como matriz Denavit Hartenberg. Veamos por qué es tan importante dentro de la cinemática de los robots.

Denavit y Hartenberg (1955) mostraron que cualesquiera dos sistemas referenciales vecinos pueden hacerse coincidir mediante una secuencia específica de cuando más dos rotaciones y dos traslaciones. Con el fin de entender lo anterior, es necesario estudiar el mecanismo espacial que se



**Figura 2.18** Una articulación espacial.

muestra en la figura 2.18. Un sistema de coordenadas ortonormales ( $XYZ$ ) se asigna al eslabón  $i$ , en donde el eje  $Z_i$  coincide con el eje de rotación de la articulación  $i + 1$  y el eje  $X_i$  es normal al eje  $Z_{i-1}$  apuntando hacia fuera del mismo, mientras que el eje  $Y_i$  se encuentra a ángulos rectos con respecto a los otros dos. Al eslabón  $i$  lo definen dos parámetros particulares:  $L_i$ , la distancia normal común entre el eje  $Z_{i-1}$  y el eje  $Z_i$  y  $\alpha_i$ , el ángulo de giro medido entre los ejes  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$  en un plano perpendicular a  $L_i$ . La articulación  $i$  tiene dos parámetros importantes: la distancia  $D_i$  medida entre los ejes  $X_{i-1}$  y  $X_i$  y una variable de revolución de la articulación  $\theta_i$ , que es el ángulo de la articulación entre las normales medido sobre un plano normal al eje de la articulación.

Una vez fijos los sistemas referenciales a todos los eslabones de acuerdo con este esquema, podrá entonces determinarse la relación entre sistemas sucesivos de la manera que se describe a continuación. Trabajando hacia adelante a partir del sistema  $(XYZ)_{i-1}$  hacia el sistema  $(XYZ)_i$ , podrán identificarse las rotaciones y traslaciones necesarias para hacer que coincidan los sistemas. Será necesario:

- 1) rotar el sistema  $i - 1$  a través de un ángulo  $\theta$  positivo alrededor del eje  $Z$  con el fin de alinear los ejes  $X$
- 2) trasladarlo una distancia  $D_i$  en sentido positivo sobre  $Z_{i-1}$
- 3) trasladarlo una distancia  $L_i$  en sentido positivo sobre  $X_i$
- 4) rotarlo un ángulo  $\alpha$  positivo alrededor del eje  $X_i$  con el fin de alinear los ejes  $Z$ .

El lector podrá haberse dado cuenta de que estas series de transformaciones son iguales a las presentadas anteriormente. La transformación global es entonces

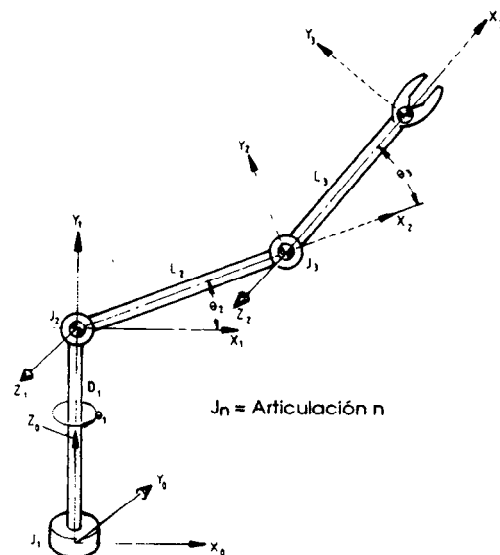
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{i-1} = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -C\alpha_1 S\theta_1 & S\alpha_1 S\theta_1 & L_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 & C\alpha_1 C\theta_1 & -S\alpha_1 C\theta_1 & L_1 S\theta_1 \\ 0 & S\alpha_1 & C\alpha_1 & D_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_i \quad (2.24)$$

### Métodos matriciales aplicados a un robot con $M = 3$

La matriz de  $4 \times 4$  se denomina con frecuencia matriz  $A$ . Demostremos su uso examinando el manipulador de tres eslabones que se muestra en la figura 2.19, el cual representa un tronco que transporta un brazo antropomórfico. El tronco gira sobre un eje vertical. Primero se establecen los sistemas de coordenadas, seleccionando ejes de rotación para los ejes  $Z$ . El eslabón 1 rota un ángulo  $\theta_1$  sobre  $Z_0$ ; el eslabón 2 gira un ángulo  $\theta_2$  sobre  $Z_1$ ; el eslabón 3 gira un ángulo  $\theta_3$  sobre  $Z_2$ . El sistema referencial 0 está fijo a tierra, el sistema 1 al eslabón 1, el sistema 2 al eslabón 2 y el sistema 3 al eslabón 3.

Un análisis de la figura 2.19 permite derivar las siguientes conclusiones. Primero, al mover el sistema 0 para hacerlo coincidir con el sistema 1:

- 1) debe rotarse un ángulo  $\theta_1$  en sentido positivo sobre el eje  $Z_0$
- 2) debe trasladarse una distancia  $D_1$  sobre  $Z_0$
- 3) no es necesario un movimiento de traslación sobre  $X_1$  ( $L_1 = 0$ )
- 4) debe rotarse,  $90^\circ$  en sentido positivo alrededor del eje  $X_1$  ( $\alpha = 90^\circ$ )



**Figura 2.19** Un manipulador ( $M = 3$ ) que muestra los sistemas de coordenadas.

Siguiendo este procedimiento para los tres eslabones es posible construir la tabla 2.1.

Tabla 2.1

<i>Eslabón</i>	$\alpha$	$L$	$D$	$\theta$
1	$90^\circ$	0	$D_1$	$\theta_1$
2	0	$L_2$	0	$\theta_2$
3	0	$L_3$	0	$\theta_3$

Las matrices  $A$  podrán construirse ahora de la siguiente manera:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} C1 & 0 & S1 & 0 \\ S1 & 0 & -C1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & D_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1A_2 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & L_2C2 \\ S2 & C2 & 0 & L_2S2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & L_3C3 \\ S3 & C3 & 0 & L_3S3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

en donde  $C1 = \cos \theta_1$ , etc., y

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_0 = ({}^0A_1)({}^1A_2)({}^2A_3) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_3$$

En general, la matriz de transformación global  $T$  se define por

$${}_nT_m = ({}_nA_{n+1})({}_{n+1}A_{n+2}) \dots ({}_{m-1}A_m) \quad (2.25)$$

En este caso

$${}_0T_3 = ({}_0A_1)({}^1A_2)({}^2A_3)$$

y la multiplicación de las matrices da como resultado

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C1C23 & -C1S23 & S1 & C1(L_2C2 + L_3C23) \\ S1C23 & -S1S23 & -C1 & S1(L_2C2 + L_3C23) \\ S23 & C23 & 0 & (D_1 + L_2S2 + L_3S23) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

en donde  $C23 = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ , etc.

Entonces, por ejemplo, las coordenadas  $(XYZ)_0$  del extremo del eslabón 3 son

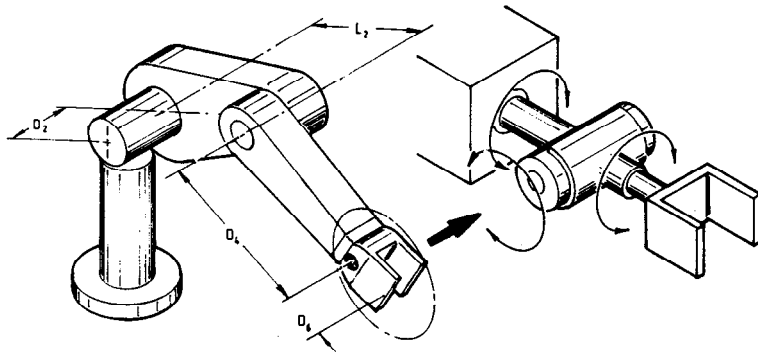
$$\left. \begin{aligned} x_0 &= C1(L_2C2 + L_3C23) \\ y_0 &= S1(L_2C2 + L_3C23) \\ z_0 &= D_1 + L_2S2 + L_3S23 \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Este resultado coincide con el derivado anteriormente en las ecuaciones (2.9) e ilustrado en la figura 2.14.

Este es un momento adecuado para hacer referencia a las articulaciones prismáticas. Tanto la matriz Deavit-Hartenberg antes desarrollada como los ejemplos presentados con anterioridad, se refieren en forma exclusiva a articulaciones rotacionales, pero esto no debe llevar al lector a la conclusión de que este método no puede manejar articulaciones prismáticas. Las limitaciones de espacio no nos permiten un análisis adecuado del tema por lo que se recomienda al lector interesado que consulte la literatura relevante (Paul, 1982; Paul y colaboradores, 1981). Sin embargo, vale la pena hacer notar dos diferencias importantes entre el manejo matricial para articulaciones rotacionales y para articulaciones prismáticas. Para las últimas, la distancia  $D$  es la variable conjunta y la longitud  $L$  no tiene significado y, por lo tanto, se establece como 0.

### **Métodos matriciales aplicados a un robot con $M = 6$**

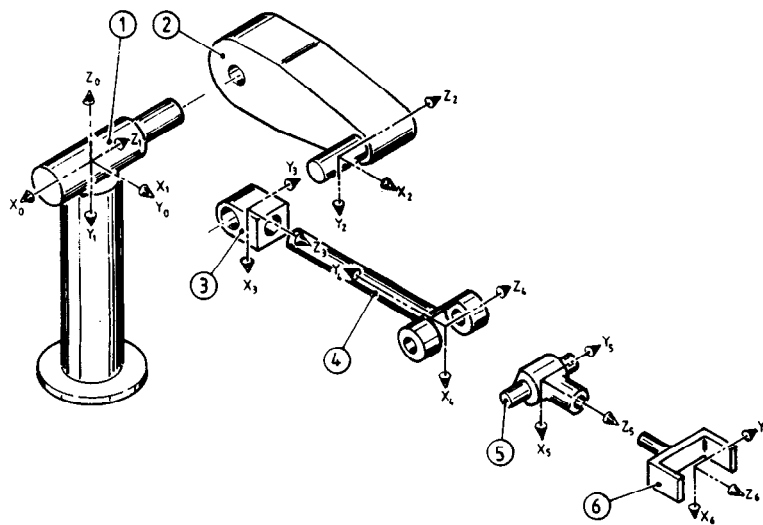
Se usará un robot comercial con seis grados de libertad como último ejemplo del uso de las matrices  $A$ . En la figura 2.20 se presenta un esquema del robot Puma de *Unimate*. Su brazo articulado tiene tres grados de libertad y la mano (figura 2.20(b)) tiene otros tres grados de libertad con respecto a la muñeca. (Posteriormente se examinarán otras configuraciones de muñeca). Será necesario establecer sistemas de coordenadas o referenciales para cada grado de libertad, acoplados a los eslabones apropiados. El método para asignar estos sistemas referenciales se muestra en la figura 2.21 en donde, como antes, los ejes  $Z$  se colocan sobre los ejes de rotación. Los números de los eslabones se muestran en los rectángulos. Los movimientos de rotación y traslación necesarios se resumen en la tabla 2.2.



**Figura 2.20** El robot Puma de *Unimate* mostrando el detalle de la muñeca.

**Tabla 2.2**

<i>Eslabón</i>	$\alpha$	$L$	$D$	$\theta$
1	-90	0	0	$\theta_1$
2	0	$L_2$	$D_2$	$\theta_2$
3	90	0	0	$\theta_3$
4	-90	0	$D_4$	$\theta_4$
5	90	0	0	$\theta_5$
6	0	0	$D_6$	$\theta_6$



**Figura 2.21** Sistemas de coordenadas para el robot Puma de *Unimate*.

La ubicación y orientación de los sistemas es la parte más difícil de esta técnica. Es necesario asegurar que el sistema referencial  $i - 1$  pueda hacerse coincidir con el sistema referencial  $i$  mediante una rotación sobre  $z_{i-1}$ , una traslación sobre  $z_{i-1}$ , una traslación sobre  $x_i$  y, por último, una rotación sobre  $x_i$ . Debe notarse que, para mayor conveniencia, se han hecho coincidir los orígenes del sistema referencial 0 y del sistema referencial 1.

Con la ayuda de la tabla 2.2 y de la ecuación (2.24) se podrán construir ahora las matrices  $A$ :

$$\begin{aligned}
 {}_0A_1 &= \begin{bmatrix} C1 & 0 & -S1 & 0 \\ S1 & 0 & C1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}_1A_2 &= \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & L_2C2 \\ S2 & C2 & 0 & L_2S2 \\ 0 & 0 & 1 & D_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}_2A_3 &= \begin{bmatrix} C3 & 0 & S3 & 0 \\ S3 & 0 & -C3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}_3A_4 &= \begin{bmatrix} C4 & 0 & -S4 & 0 \\ S4 & 0 & C4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & D_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}_4A_5 &= \begin{bmatrix} C5 & 0 & S5 & 0 \\ S5 & 0 & -C5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}_5A_6 &= \begin{bmatrix} C6 & -S6 & 0 & 0 \\ S6 & C6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & D_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

La transformación global entre el sistema 6 y el sistema 0 se obtiene de

$$\begin{aligned}
 {}_0T_6 &= ({}_0A_1)({}_1A_2)({}_2A_3)({}_3A_4)({}_4A_5)({}_5A_6) \\
 &= \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)
 \end{aligned}$$

en donde (véase Lee y Ziegler (1983))

$$\begin{aligned}
 n_x &= C1[C23(C4C5C6 - S4S6) - S23S5S6] - S1[S4C5C6 + C4S6] \\
 n_y &= S1[C23(C4C5C6 - S4S6) - S23S5C6] + C1[S5C5C6 + C4S6] \\
 n_z &= -S23[C4C5C6 - S4S6] - C23S5C6 \\
 s_x &= C1[-C23(C4C5S6 + S4C6) + S23S5S6] - S1[C4C6 - S4C5S6] \\
 s_y &= S1[-C23(C4C5S6 + S4C6) + S23S5S6] + C1[C4C6 - S4C5S6]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
s_z &= S23(C4C5S6 + S4C6) + C23S5S6 \\
a_x &= C1(C23C4S5 + S23C5) - S1S4S5 \\
a_y &= S1(C23C4S5 + S23C5) + C1S4S5 \\
a_z &= C23C5 - S23C4S5 \\
P_x &= C1[D_6(C23C4S5 + S23C5) + S23D_4 + L_2C2] - S1(D_6S4S5 + D_2) \\
P_y &= S1[D_6(C23C4S5 + S23C5) + S23D_4 + L_2C2] + C1(D_6S4S5 + D_2) \\
P_z &= D_6(C23C5 - S23C4S5) + C23D_4 - L_2S2
\end{aligned}$$

### **El problema inverso con $M = 6$**

En el caso recién analizado resultó claro que incluso la transformación directa de las coordenadas máquina a las coordenadas reales requiere una cantidad considerable de cálculos. El problema inverso es todavía más complejo. En diversas investigaciones (Paul y colaboradores, 1981; Lee y Ziegler, 1983) se han utilizado métodos basados en la trigonometría, comenzando en el efector final y trabajando hacia atrás. Estos métodos son una extensión de las técnicas antes estudiadas y que se ilustran en la figura 2.19. Otros investigadores (Milenkovic, 1979), han creado técnicas iterativas que requieren que el robot se divida conceptualmente en dos mecanismos articulados. Uno de ellos, el mecanismo mayor, consiste en las primeras tres articulaciones y produce los grandes movimientos de posicionamiento del efector final. En la figura 2.10 se vieron diversos ejemplos de estos mecanismos mayores. El otro mecanismo articulado, la muñeca, orienta al efector final. El procedimiento iterativo calcula y ajusta en forma alternada las coordenadas máquina del mecanismo mayor para corregir la posición, mientras mantiene fija la muñeca y luego ajusta las rotaciones de la muñeca para corregir la orientación mientras mantiene fijas las coordenadas espaciales de la muñeca. Se ha encontrado que este proceso converge rápidamente.

La complejidad del problema inverso es otra razón para preferir los sistemas operados en paralelo como los que se muestran en la figura 2.10 a los sistemas operados en serie. La ecuación (2.6) mostró cómo una de las coordenadas máquina puede determinarse al conocer las coordenadas reales. Pueden formularse expresiones similares simples, aunque extensas, para sistemas con seis grados de libertad (Stewart, 1965).

### **Diferenciales**

La dificultad de la solución del problema inverso puede reducirse usando pequeñas perturbaciones o movimientos diferenciales para establecer ecuaciones lineales. Considérese por ejemplo el robot de brazo articulado de la figura 2.19. Se vio que las coordenadas del sistema referencial 0 están relacionadas con las del sistema referencial 3 por la transformación



$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_0 = T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_3$$

en donde  $T$  estaba dada por la ecuación (2.26).

La pregunta que se hace ahora es, dadas las coordenadas de un punto en el sistema referencial 3, ¿qué perturbaciones ocurrirán en sus coordenadas en el sistema referencial 0 si existen perturbaciones en las coordenadas máquina  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$ ? Para simplificar las cosas, consideremos el punto  $x_3 = y_3 = z_3 = 0$ . Entonces se tendrá

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= C1(L_2C2 + L_3C23) \\ y_0 &= S1(L_2C2 + L_3C23) \\ z_0 &= D_1 + L_2S2 + L_3S23 \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Si ocurren pequeñas perturbaciones resultantes en  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$  entonces las perturbaciones resultantes en  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$  serán

$$\begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_0}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_0}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x_0}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y_0}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_0}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y_0}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z_0}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z_0}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z_0}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

La matriz  $3 \times 3$  con frecuencia se denomina Jacobiano,  $J$ .

Las derivadas  $\partial x_0 / \partial \theta_1$ , etc., se determinan mediante la derivación de la ecuación (2.29). Por ejemplo,

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_0}{\partial \theta_1} &= -(L_2C2 + L_3C23)S1 \\ \frac{\partial x_0}{\partial \theta_2} &= -(L_2S2 + L_3S23)C1 \\ \frac{\partial x_0}{\partial \theta_3} &= (L_2C2 - L_3S23)C1 \end{aligned}$$

Por lo tanto, es posible evaluar  $J$  dados los valores iniciales de  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$ . Por ejemplo, con  $L_2 = L_3 = 1$ ;  $\theta_1 = 30^\circ$ ;  $\theta_2 = 60^\circ$  y  $\theta_3 = 30^\circ$ , el Jacobiano se transforma en

$$J = \begin{bmatrix} -0.250 & -1.616 & -0.866 \\ -0.433 & -0.933 & -0.500 \\ 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

Así, para perturbaciones conocidas en  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$ , las perturbaciones resultantes en  $x$ ,  $y$  y  $z$  pueden calcularse, es decir, el problema directo. Por ejemplo, si  $\Delta \theta_1 = \Delta \theta_2 = \Delta \theta_3 = 0.05$  rad, entonces

	Aproximación	Valor Exacto
$\Delta x =$	-0.1316	-0.1337
$\Delta y =$	-0.0500	-0.0566
$\Delta z =$	0.0250	0.0189

Los valores exactos se calcularon utilizando las ecuaciones (2.29). La precisión de la aproximación mejorará conforme  $\Delta \theta$  disminuya.

Sin embargo, en este caso lo que interesa es el problema inverso que resulta más difícil: conociendo  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , ¿cuáles son los valores de  $\Delta \theta_1$ ,  $\Delta \theta_2$  y  $\Delta \theta_3$ ? Para resolver este problema, la ecuación (2.30) tendrá que reescribirse como

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

en donde  $J^{-1}$  es la inversa de  $J$ . La inversa de una matriz cuadrada  $J$  se obtiene de

$$J^{-1} = \frac{\text{adj}(J)}{(J)}$$

en donde  $\text{adj}(J)$  es la adjunta de  $J$  y  $(J)$  es el determinante de  $J$ . En este caso

$$J^{-1} = -4 \begin{bmatrix} 0.250 & -0.433 & 0 \\ 0 & 0 & -0.500 \\ 0.2165 & 0.125 & 0.933 \end{bmatrix}$$

y tomando las perturbaciones  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.025$  se obtiene

	Aproximación	Valor Exacto
$\Delta\theta_1 =$	1.049°	0.981°
$\Delta\theta_2 =$	2.865°	3.496°
$\Delta\theta_3 =$	-7.303°	-8.130°

Los valores exactos se obtuvieron de las ecuaciones (2.12). Una vez más, los errores parecen ser importantes, pero pueden reducirse al hacer que las perturbaciones  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  sean más pequeñas. En el ejemplo trabajado, las perturbaciones eran relativamente grandes, es decir, 2.5 cm para un eslabón con una longitud de 1 m.

De esta forma, aun cuando este método reduce la complejidad del problema inverso, trae consigo imprecisiones que pueden reducirse sólo mediante el uso de perturbaciones muy pequeñas. Si esta técnica se empleara para guiar un efector final sobre una ruta continua, la ruta tendría que dividirse en varios segmentos y el movimiento a lo largo de cada una de ellos se determinaría entonces por el tiempo requerido para su cálculo.

Existen aplicaciones en donde una precisión extrema no es importante, como en el caso de prótesis de brazos o dispositivos teleoperados (véase el capítulo 10) y, en estos casos, la técnica resulta de gran utilidad. Existen otros casos en los que, por la naturaleza del problema, las perturbaciones son muy pequeñas y la técnica resulta satisfactoria. Uno de estos casos es la tolerancia de los movimientos causados por la flexibilidad de la estructura del robot (Paul, 1982). Por último, el método es directamente aplicable cuando se utiliza un control de velocidad, es decir, la velocidad del efector final en el espacio es proporcional a la rapidez del cambio de las coordenadas máquina. Se verá algo más de este punto en el capítulo 5.

## 2.6 Resumen

En este capítulo se ha intentado demostrar cómo se puede evaluar el número de grados de libertad del mecanismo de un robot. Se han identificado mecanismos para operación en serie y operación en paralelo; aun cuando la vasta mayoría de los robots existentes utilizan la operación en serie, la operación en paralelo tiene muchas ventajas que ofrecer.

Se han usado métodos trigonométricos y matriciales para establecer relaciones entre las coordenadas reales del efector final y las coordenadas máquina del robot. Se han discutido problemas tanto directos como inversos; los últimos son en particular difíciles cuando la movilidad es elevada. El método de diferenciales es útil en la solución de problemas inversos.



# Capítulo 3

## *Muñecas, manos, patas y pies*

---

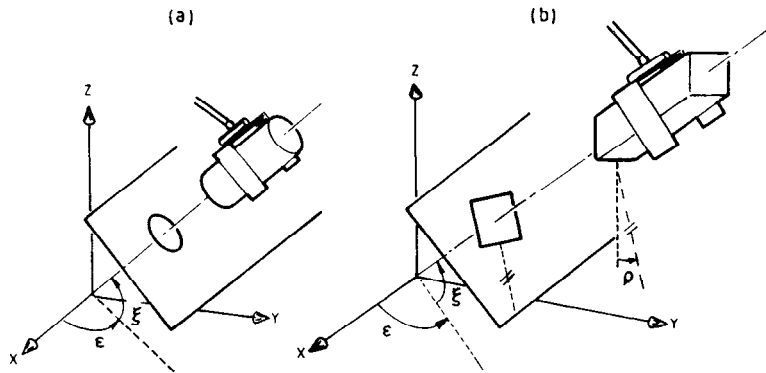
### 3.1 Introducción

En términos antropomórficos, el capítulo anterior se concentró en el tronco y brazo del robot. Ahora se examinarán las otras partes esenciales de su anatomía. Se requiere una muñeca para orientar la mano o efector final en el espacio; además la mano debe ser capaz por sí misma de sujetar una herramienta o pieza de trabajo. Si se desea contar con movilidad, el robot deberá estar equipado con ruedas, rieles o patas.

### 3.2 Muñecas

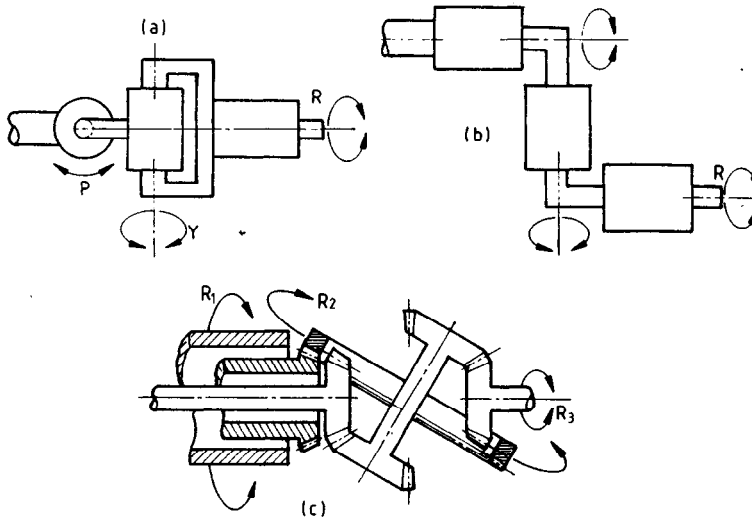
En tanto que los tres primeros eslabones de un robot se usan para el control de la posición general de un efector final, la función principal del eslabón de la muñeca es la orientación angular. Algunos de los robots más sencillos no tienen muñecas: se utilizan donde las herramientas colocan la pieza de trabajo con una orientación fija con respecto al robot. Sin embargo, la mayoría de las tareas requieren cuando menos una orientación angular y muchas requerirán el máximo posible de tres. En la figura 3.1 se muestran dos trabajos de ensamble para la inserción de un perno en un orificio (Potkonjac y colaboradores, 1983), un cilindro en un orificio circular y un cuboide en un orificio cuadrado. El primero requiere el ajuste correcto de dos rotaciones angulares independientes,  $\epsilon$  y  $\xi$ . En el segundo caso, el cuboide, al carecer de la simetría axial del cilindro, requiere tres orientaciones,  $\epsilon$ ,  $\xi$  y  $\rho$ . Debe notarse que estos ángulos están dados en coordenadas reales.

Cada orientación independiente del efector final requiere un grado de libertad correspondiente en el conjunto de la muñeca. Los tres términos usados con mayor frecuencia para la orientación del efector final son



**Figura 3.1** Libertades de orientación requeridas: (a) inclinación vertical  $\varepsilon$  e inclinación horizontal  $\xi$  son suficientes cuando el objeto tiene simetría axial; (b) también se requiere una rotación  $p$  cuando no existe simetría axial.

inclinación horizontal, inclinación vertical y oscilación. La *inclinación horizontal* o *elevación* es la rotación del efector final sobre un eje horizontal en el extremo del brazo del robot y perpendicular a su eje. Controla el ángulo  $\xi$  en la figura 3.1(b). Permite al efector final un movimiento giratorio hacia arriba y hacia abajo. La *inclinación vertical* o *azimutal* es la rotación sobre un eje vertical perpendicular a su eje. Permite al efector final un movimiento de rotación de lado a lado y controla el ángulo  $\varepsilon$  en



**Figura 3.2** Muñecas: (a) todos los ejes son perpendiculares uno con respecto al otro; (b) todos los elementos son capaces de una rotación continua; (c) un diseño que permite un impulso remoto.

la figura 3.1(b). Por último, la *oscilación* o *balanceo* es la rotación sobre el eje longitudinal de la muñeca. Controla el ángulo  $\rho$ .

Estos movimientos se ilustran en mayor detalle en la figura 3.2. El diagrama (a) muestra una elevación lateral de una muñeca con tres grados de libertad, usando tres actuadores, cada uno de ellos con su eje perpendicular a aquellos de los otros dos y cada uno dedicado a definir una orientación particular, inclinación horizontal  $P$ , inclinación vertical  $Y$  y oscilación  $R$ . ( $P$ ,  $Y$  y  $R$  son coordenadas de máquina). Debe notarse que el efector final está acoplado al eje de oscilación; esto permite usar herramientas giratorias como los taladros. Este diseño no es particularmente compacto y es difícil de impulsar a distancia; requiere generalmente un actuador directo con motores colocados en la forma mostrada; así, el brazo tiene que llevar estos motores como una carga adicional. Sin embargo, es posible obtener grandes movimientos angulares y pueden manejarse cargas entre medianas y pesadas.

Una configuración diferente se muestra en la figura 3.2(b). En este caso, rotaciones combinadas sobre los dos primeros ejes producen las inclinaciones horizontal y vertical (Stackhouse, 1979; Colson y Perreira, 1983). El tercer eje da la oscilación. En contraste con (a), los tres ejes pueden suministrar una rotación continua y son fácilmente impulsados por actuadores remotos. Este conjunto puede ser bastante compacto y puede manejar cargas de pequeñas a medianas.

Antes de pasar a la figura 3.2(c) se pide al lector que regrese a la figura 2.20 en la que se muestra otra muñeca compacta con tres grados de libertad. Además, a diferencia de (a), no existen ejes específicos para las inclinaciones horizontal y vertical y las rotaciones combinadas de los primeros dos ejes proveen estos movimientos. Pueden lograrse grandes giros angulares. Como los tres ejes se intersecan el conjunto puede ser compacto e impulsarse a distancia.

Regresando a la figura 3.2(c) puede verse ahora cómo una muñeca se impulsa a distancia. (Stackhouse, 1979). Motores distantes impulsan árboles concéntricos. El árbol del motor  $R_1$  hace girar directamente el conjunto que contiene los ejes  $R_2$  y  $R_3$ , mientras que el eje  $R_2$  hace girar la estructura  $R_3$  sobre una superficie cónica en el espacio. La rotación sobre cada eje es continua y reversible. El actuador remoto, y el hecho de que los tres ejes se intersecan, permiten lograr un diseño extremadamente compacto.

### 3.3 Tenazas

Existen muchas formas de suministrar seis grados de libertad a un efector final, pero ninguna de ellas sirve para un propósito útil sino hasta que se incluye una verdadera carga de trabajo. Lo anterior puede tomar la forma de una herramienta, como puede ser un portaelectrodos de soldadura, un

taladro, una pistola rociadora, etc. En forma optativa, la carga de trabajo puede ser un objeto, como en el caso de una pieza fundida, un chocolate, una hoja de vidrio, que se transfiere de una estación de trabajo a otra.

Pasaremos por alto el especializado sujetador de herramientas y concentraremos nuestra atención en la tenaza, cuya función principal consiste en sujetar y soltar piezas de trabajo durante una transferencia. Con base en los trabajos de Fan Yu Chen (1982), las tenazas se clasifican como mecánicas, de vacío y magnéticas, o universales.

### **Tenazas mecánicas**

Las tenazas mecánicas, de acuerdo con Konstantinov (1975) pueden subdividirse todavía en los siguientes tipos: articuladas, cremallera y piñón, de biela, de tornillo, de cuerda y polea y diversos. En la figura 3.3 se muestran ejemplos de los primeros cuatro tipos. La tenaza articulada se ilustra en los esquemas (a) a (d), el tipo de cremallera y piñón en (e) y (f), el tipo de biela en (g) y (h) y el tipo de tornillo en (i) y (j). El funcionamiento de estas tenazas es evidente pero deben hacerse notar ciertos factores:

- (a) y (b) usan solamente pares rotacionales
- (c) y (d) usan pares tanto prismáticos como rotacionales
- (b), (c) y (h) se emplean para la sujeción interna
- (d) se conoce como el mecanismo de bloque oscilatorio
- (g) utiliza un resorte para la liberación
- (e), (i) y (j) requieren entradas giratorias
- (f) provee un movimiento en paralelo de las mordazas de las tenazas
- (g) y (h) pueden usar una gran variedad de perfiles de bielas, velocidad constante, armónicas, etc.

En todos los casos, la fuerza de entrada se puede suministrar por medio de motores o actuadores neumáticos, hidráulicos o eléctricos. La tenaza dirige y magnifica esta fuerza; la fuerza requerida en las mordazas, depende del peso del componente, de la fricción entre las mordazas y el componente, la aceleración del efector final, la orientación del componente en las mordazas, la relación entre la dirección del movimiento y la anterior orientación.

Otro ejemplo interesante del uso de enlaces mecánicos es el dispositivo de docilidad con centro remoto (*Remote Centre Compliance, RCC*) (Whitney y Nevins, 1979). Aunque en realidad no se trata de unas tenazas, es conveniente hacer referencia al RCC en este momento ya que ayuda a las tenazas mecánicas a tener una mayor efectividad como herramienta de ensamble. El RCC actúa como un "punto de flotación" sobre ejes múltiples, lo cual permite el ajuste de desviaciones en las alineaciones lateral y angular.



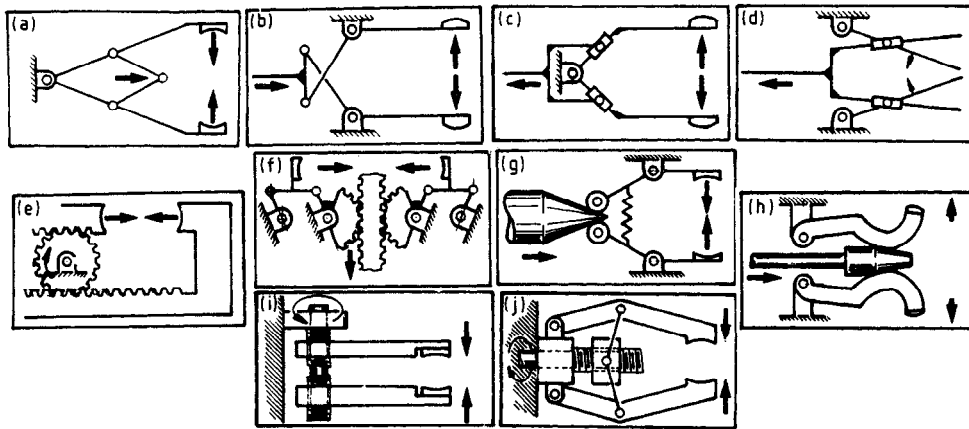
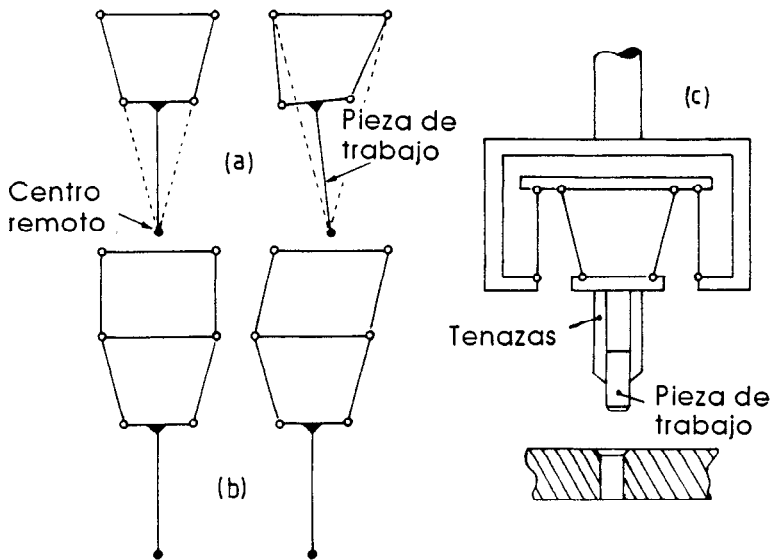


Figura 3.3 Tenazas mecánicas.

En la figura 3.4 se ilustra su principio de operación. La tarea consiste en insertar un perno cilíndrico en un orificio redondo, donde existe la posibilidad de que hayan errores tanto lineales como angulares en la posición del perno con respecto al orificio. El RCC está diseñado de manera que el error lateral no se convierta en un error angular durante el acoplamiento. En la figura 3.4(a) se muestra cómo se sostiene un perno de manera que pueda girar sobre su punta, esto es, sobre el punto en el que se acopla a otra parte. Esto permite que el perno se alinee a sí mismo en respuesta a las fuerzas de contacto durante su inserción en el orificio. El punto de rotación se conoce como centro remoto y es, obviamente, una parte poco usual de la curva de un acoplador.

Una característica única del dispositivo RCC es que absorbe los errores lateral y angular en forma independiente. En la figura 3.4(b) se muestra cómo la adición de un enlace paralelogramo permite el acomodo de los errores laterales. En combinación, los enlaces verticales con su centro remoto en el infinito permiten solamente un movimiento lateral, mientras que el enlace inferior con su centro remoto en el extremo del perno permite sólo una rotación angular en respuesta a los momentos aplicados en el extremo. Durante el ensamble, la parte lateral está activa en la fase inicial de la tarea, mientras que la parte angular se desactiva durante la inserción. En la figura 3.4(c) se muestra una versión compacta y simétrica del RCC.

La clasificación de Fan Yu Chen de las tenazas mecánicas incluye una subsección para tipos diversos. Vale la pena mencionar dos tenazas en particular dentro de este tipo: ambas utilizan aire a presión para cambiar la forma de una bolsa flexible. Las primeras, las tenazas de expansión (Lundstrom y colaboradores, 1977) se usan con frecuencia cuando los



**Figura 3.4** Dispositivo de docilidad con centro remoto (RCC): (a) el enlace permite la rotación sobre el centro remoto; (b) se da cabida a una compensación lateral; (c) una configuración práctica.

componentes cuentan con orificios o perforaciones convenientemente ubicados. El más sencillo de estos tipos usa una hoja de poliuretano que se empuja hacia dentro de un orificio y después se infla (Neubauer, 1982). Pueden generarse fuerzas de sujeción de aproximadamente 500 N. Para componentes delicados como vidrio o plástico, pueden emplearse diafragmas de butadieno nitrilo operados a presiones de aproximadamente 2 bar. La sujeción externa puede lograrse por medio de anillos expansibles de caucho, colocados, por ejemplo, alrededor del cuello de una botella y, después, presurizados.

Las otras tenazas que vale la pena mencionar bajo la clasificación de diversos utilizan dedos neumáticos, cada uno de los cuales consiste en un cuerpo hueco de poliuretano con dientes en uno de sus lados (Neubauer, 1982). Los dientes se expanden cuando se suministra aire comprimido, provocando que el dedo se doble hacia afuera de los dientes y sobre la parte por sujetar. Una mano de este tipo con dos dedos puede sujetar una carga de 60 N cuando se opera a 5 bar.

### ***Operación en vacío y magnética***

Las copas de vacío (Lundstram y colaboradores, 1979; Neubauer, 1982) ofrecen una forma cómoda de sujeción cuando las superficies son planas y tersas, por ejemplo, vidrio. Las copas son básicamente de dos tipos. Una se basa en el vacío natural que se crea cuando se oprime una copa sobre

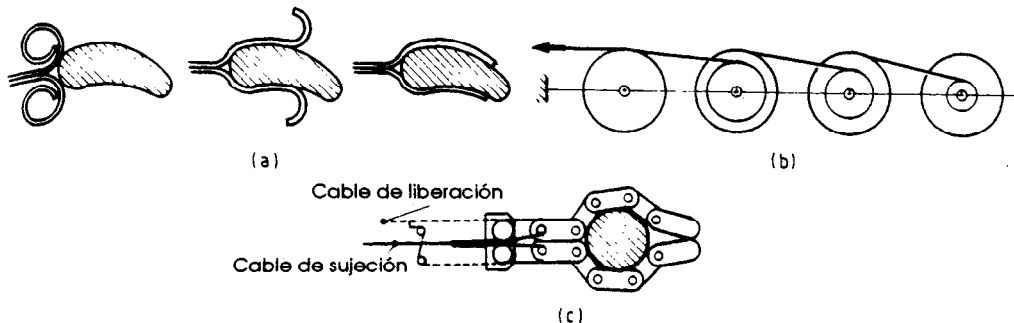
una superficie plana; la fuerza máxima de sujeción para cada copa es de aproximadamente 140 N. El otro tipo se opera con una bomba de vacío y puede usarse en partes con superficies más rugosas. Dependiendo de la calidad de la superficie, se pueden lograr fuerzas de hasta 200 N. Por lo común se utilizan varias copas distribuidas en una configuración según el componente por manejar.

Las tenazas magnéticas (Chen, 1982; Neubauer, 1982) se usan con frecuencia cuando se han de manejar materiales ferrosos planos. Pueden emplearse imanes permanentes o electroimanes. Los imanes permanentes no requieren una fuente de energía y son, por lo tanto, adecuados para usarse en ambientes peligrosos, pero también presentan algunas desventajas: los componentes deben liberarse por medios mecánicos y pueden acumularse residuos ferrosos sobre el imán y el componente. Ambas desventajas se pueden eliminar si se usan electroimanes. Aun cuando requieren una fuente de energía, resultan muy adecuados para un control remoto y tienen una secuencia de sujeción y liberación rápida.

### **Tenazas universales**

La última clase de tenazas por analizar comprende los intentos más recientes de diseñar unas tenazas capaces de sujetar objetos de distintas formas. Las manos humanas son unas tenazas de este tipo; se analizarán en detalle más adelante.

En años recientes ha existido una evolución gradual a partir de las tenazas para fines especiales hacia las tenazas versátiles. Uno de los primeros pasos hacia una mayor universalidad fue la introducción de las tenazas dobles (Reed, 1979), que permiten manejar de manera simultánea componentes tanto maquinados como no maquinados durante un ciclo cualquiera de maquinado: dos manos son mejor que una. Otro avance importante hacia la tenaza universal son las tenazas inflables (Chen, 1982)



**Figura 3.5** Las tenazas suaves: (a) acción de prensión; (b) las poleas proveen una presión uniforme; (c) sujeción de un cilindro.

que pueden adaptar su forma a una gran variedad de perfiles. Estos dispositivos se basan en el uso de una bolsa flexible llena de algún material suelto, como pueden ser pequeñas partículas esféricas de vidrio o metal. Esta bolsa, colocada alrededor del componente, se presuriza para ajustarla a la forma del componente. La bolsa se vacía luego y el material suelto se consolida para sostener la parte firmemente. Lundstrom ha ideado un enfoque más directo a las tenazas universales (1976) utilizando una técnica de moldeado rápido para producir tenazas para una gran variedad de formas distintas.

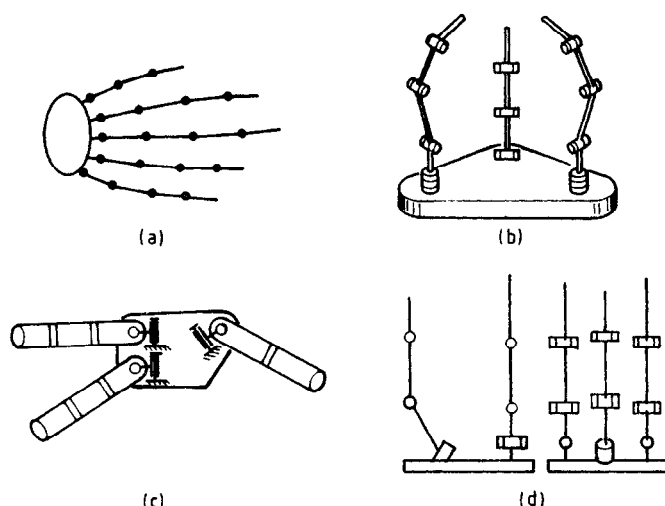
Otro paso evolutivo que vale la pena mencionar dentro del diseño de tenazas son las denominadas tenazas suaves (Hirose y Umetani, 1977) (figura 3.5). Inspirado en observaciones del movimiento de las serpientes, este dispositivo tiene un sencillo sistema de control y puede amoldarse con suavidad y delicadeza a objetos de cualquier forma. Durante la sujeción ejerce una presión uniforme sobre la superficie del componente. En la figura 3.5(a) se muestra cómo la tenaza suave envuelve gradualmente un objeto. Como se muestra en (b) y (c), las tenazas consisten en una serie de eslabones, cada uno con un par aplicado por medio de un cable de sujeción. Con el fin de obtener una distribución uniforme de la presión sobre todo el componente, el par aplicado a cada eslabón debe disminuir al aproximarse al extremo. (Lo anterior es similar a la variación del momento de flexión sobre una viga cantiléver con una carga uniforme). La variación requerida en el par se genera por medio de la configuración de polea que se muestra en (b).

Los usos futuros para las tenazas suaves incluyen el manejo de cerámica, la cosecha de frutas, el manejo de huevos, el transporte de pacientes de hospital de cama a cama y la captura de animales salvajes.

### *Manos mecánicas*

Las tenazas universales por excelencia son las manos humanas (Kato, 1977) pero su complejidad es tan grande que la posibilidad de ver su equivalente tecnológico es extremadamente remota. Los huesos de la mano humana (figura 3.6(a)) están subdivididos en tres segmentos: el carpo o huesos de la muñeca; el metacarpo o huesos de la palma; y las falanges o huesos de los dedos. Hay ocho huesos en el carpo; cinco huesos en el metacarpo, uno para cada dedo; y catorce falanges, tres para cada dedo y dos para el pulgar. En total, estos huesos permiten aproximadamente 22 grados de libertad principales.

Para aplicaciones en el campo de la robótica se ha concluido que tres dedos brindarían una flexibilidad adecuada. En las figuras 3.6(b), (c) y (d) se muestran varios diseños de este tipo. En (b) (Skinner, 1975), cada dedo, al igual que la mano humana, tiene tres falanges. Todas las articulaciones usan pares R simples. Dos de los dedos, los números 2 y 3, pueden girarse



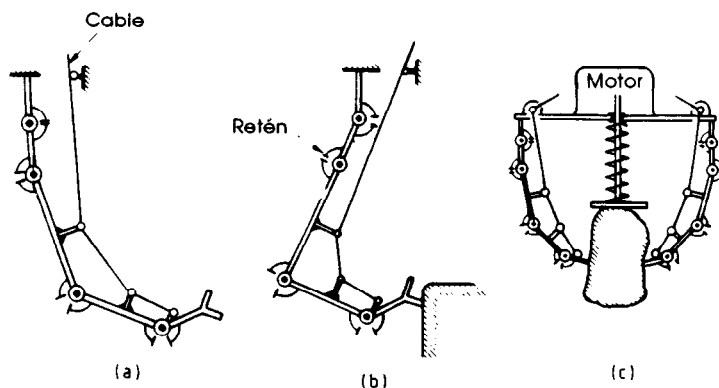
**Figura 3.6** Manos mecánicas: (a) los huesos de la mano humana; (b) tres dedos, cada uno de ellos con tres falanges; (c) dos dedos y un pulgar; (d) otro ejemplo de dos dedos y un pulgar.

sobre ejes verticales, cambiando así la dirección en que pueden flexionarse. Esto permite que la mano lleve a cabo una gran variedad de actividades prensiles. Por ejemplo, puede lograrse que los tres dedos se doblen alrededor de un objeto si se hace que las direcciones de flexión sean paralelas. Si las direcciones de flexión se distribuyen simétricamente, sin embargo, las puntas de los dedos se juntarán en una acción de pellizcar al flexionarse los dedos.

En la Figura 3.6(c) (Okada y Tsuchiya, 1977) se muestra una mano mecánica que tiene un mayor parecido a la mano humana. Esta mano tiene dos dedos y un pulgar, cada dedo con tres falanges y el pulgar con dos. Supuestamente deben corresponder a los dedos índice, medio y pulgar de la mano humana. De nuevo, al igual que la mano humana, cada dedo puede moverse como un todo de lado a lado, además de flexionarse. Los dedos son huecos; cada articulación se impulsa con cables que corren por pequeñas mangueras parecidas a bobinas de manera que los cables no interfieran con los complicados movimientos de los dedos.

En la figura 3.6(d) se muestran dos vistas de otra mano diseñada para imitar los movimientos de los dedos pulgar, índice y medio (Lian y colaboradores, 1983). Nuevamente, sólo se emplean pares R simples. Este es un diseño más sencillo que el que se muestra en (c), con dos grados de libertad menos.

Por último, se considera la mano mecánica mostrada en la figura 3.7 (Rovetta y colaboradores, 1981). Esta mano es diferente a las otras en el sentido de que incorpora una palma que, cuando se usa en conjunción con



**Figura 3.7** Mano mecánica con una palma flexible: (a) acercándose a un objeto; (b) entrando en contacto con un objeto; (c) sujetando un objeto.

los dedos, permite sujetar firmemente objetos con varias formas geométricas. Además de las tres falanges comunes, cada dedo cuenta con un cuarto eslabón en la base. Este elemento, denominado articulación inversa, reproduce la hiperextensión de la primera falange de la mano humana.

Se han instalado un resorte pretensado y un tope mecánico en cada una de las articulaciones de los dedos. Los resortes determinan los movimientos relativos de las falanges y, además, actúan para regresar los dedos a su posición de descanso. Cada falange se opera con un alambre que cambia tanto su posición como su tensión durante el movimiento del dedo. En la figura 3.7(a) se muestra un dedo acercándose a un objeto y en (b) se muestra el cambio en su configuración al entrar en contacto con dicho objeto.

Los tres dedos se usan en conjunción con una palma pretensada por un resorte. En la figura 3.7(c) se muestran dos dedos pero en la práctica se tienen tres dedos dispuestos en forma simétrica alrededor de la palma. Cuando se coloca un objeto contra los dedos, lo detecta un dispositivo óptico que activa los motores de pasos. Los alambres se ponen en tensión, los dedos tocan el componente y, junto con la palma, lo sujetan y lo levantan. Cuando el potencial del sensor de posición en la palma excede un nivel preestablecido los motores se detienen. Componentes de hasta 100 N y de diversas formas han podido sujetarse por este tipo de mano en particular.

Al concluir esta sección sobre manos mecánicas conviene llamar la atención sobre la naturaleza antropomórfica de las manos ilustradas en las figuras 3.6 y 3.7. El hombre tiende a copiar sus propios mecanismos, lo cual no es sorprendente teniendo en cuenta la versatilidad y efectividad de la máquina humana. Pero las copias antes mostradas son sólo pobres modelos funcionales de la mano humana.

Sin embargo, las manos artificiales actualmente empiezan a obtenerse con una excelente apariencia cosmética y con muchos grados de libertad.

### **3.4 Robots móviles**

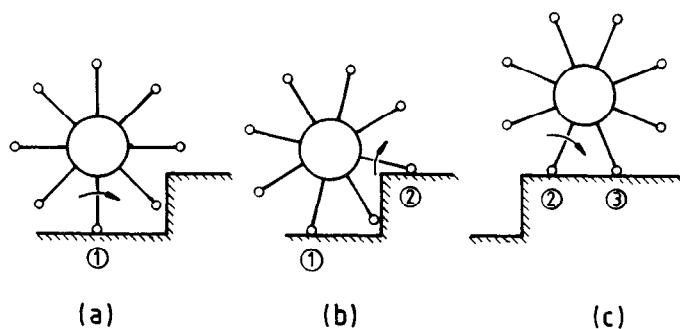
Después de analizar la parte superior del torso del robot: su cuerpo, brazos, muñecas y manos, el estudio se concentrará ahora en la mitad inferior: las patas y pies del robot.

Existen muchos casos en los que es necesario usar un robot móvil. En los sistemas de manufactura flexible (FMS), además de crear máquinas flexibles para el ensamble, el maquinado, etc., es igualmente importante que exista un medio flexible de transporte entre los distintos procesos de producción. El equipo fijo, como los rodillos, bandas y bandas transportadoras elevadas, es inflexible y cambiarlo puede resultar en extremo costoso si llegara a ser necesario cambiar la distribución de las máquinas y las rutas de transporte. Reconociendo esta dificultad, los sistemas de vehículos guiados automáticamente (AGV) han adquirido cada vez mayor popularidad durante los últimos treinta años. Estos sistemas utilizan camiones o montacargas controlados por computadora guiados por medio de alambres enterrados o cintas reflejantes. Pero puede lograrse todavía mayor flexibilidad si, en lugar de que el movimiento de los vehículos esté restringido por un conjunto de guías, fuera posible que un operador les enseñara la ruta a seguir como a cualquier otro robot.

Además de los FMS existen muchas otras aplicaciones potenciales para los robots móviles: el robot doméstico para ayudar con las labores domésticas; el robot velador para controlar la seguridad de los edificios; el robot bombero que puede llegar directamente al núcleo de un incendio; el robot para cuidado de enfermos que puede relevar a las enfermeras de las labores físicas más duras como son levantar, sostener y mover pacientes o niños minusválidos.

### **3.5 Métodos de soporte: ruedas y rieles**

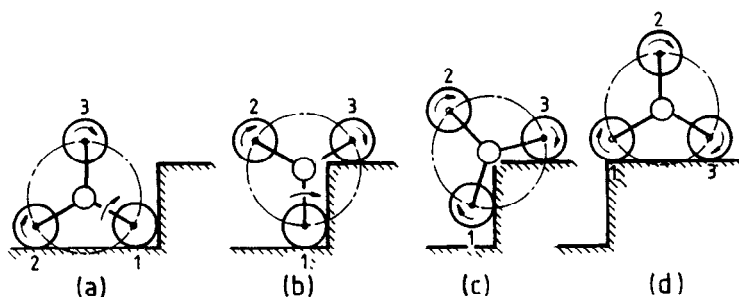
La rueda está bien establecida como método de soporte para los vehículos. Disipa poca energía, particularmente en el caso de ferrovías en donde la rueda y el riel son fuertes y lisos. Para uso en los caminos, en donde es muy probable que las superficies sean disparejas, es necesario perder un poco de energía a favor de una mayor comodidad mediante el empleo de una llanta neumática flexible. En los sistemas robot, en los que las rutas están programadas con anterioridad y los pisos son parejos, es muy usual el uso de llantas duras. Con dirección en todas las ruedas se provee un máximo de maniobrabilidad, con lo que se permite al robot moverse en ángulos rectos con respecto a una ruta dada y girar sobre su centro de



**Figura 3.8** La rueda sin rin al subir un escalón.

gravedad. Esto es particularmente útil para el desplazamiento en corredores y otras áreas restringidas.

Al programar un vehículo robot se utiliza un transductor, generalmente un codificador óptico, para contar el número de rotaciones de la rueda. Por supuesto, cuando no existen deslizamientos, lo anterior suministra una medida de la posición del vehículo. Sin embargo, si ocurre un deslizamiento, se pierde la correspondencia entre la rotación de la rueda y la posición del vehículo y resulta necesario incluir alguna forma de acción correctiva. Esto puede lograrse (Fujiwara y colaboradores, 1977) usando un giroscopio para detectar la dirección del movimiento del vehículo. Durante la enseñanza, el giroscopio mide la dirección absoluta y esta información se almacena en su memoria. Cuando el robot se desplaza en forma automática, la información medida por el giroscopio se compara con la información almacenada y se toman acciones correctivas para corregir los errores en la dirección. Los errores correspondientes a la distancia cubierta pueden corregirse incorporando al vehículo sensores ópticos que



**Figura 3.9** La rueda veneciana subiendo un escalón.



una vez que “ven” placas reflectoras, no las pierden de “vista” hasta llegar a la estación de destino.

Los robots con ruedas comunes son satisfactorios para aplicaciones en FMS, donde el terreno es plano y está bien ordenado, pero resultan inútiles en ambientes en donde se requiere subir escalones y escaleras, o rodear obstáculos de un tamaño considerable. En estos casos es necesario usar sistemas en los cuales el punto de soporte cambia en forma intermitente en lugar de hacerlo en forma continua. Los sistemas con patas operan en esta forma y se discutirán con mayor detalle posteriormente. Mientras tanto, examinemos las ruedas sin rines y la rueda veneciana.

En la figura 3.8 se muestra cómo una rueda sin rin con ocho rayos sube por un escalón. En (a) la rueda gira sobre el rayo 1 hasta que el rayo 2 entra en contacto con la parte superior del escalón como se aprecia en (b). Entonces se lleva a cabo una rotación sobre el rayo 2 hasta que el rayo 3 hace contacto y así sucesivamente. Las ruedas sin rines pueden subir escalones con alturas casi iguales al radio de la rueda (Thring, 1983). Sin embargo, su desplazamiento puede ser bastante incómodo; el centro de la rueda oscila con una amplitud de  $r(1 - \sin \pi/n)$  y una frecuencia de  $n\omega$  en donde  $r$  es el radio de la rueda,  $n$  es el número de rayos y  $\omega$  es la velocidad angular de la rueda en radianes/segundo.

La rueda veneciana es otro dispositivo para subir escalones. Se llama así porque sus orígenes se remontan a la ciudad de Venecia, en donde los cargadores las usaban como ayuda para subir y bajar las carretillas para transporte. Actualmente pueden obtenerse de fabricantes de equipo para manejo mecánico y su forma más común consiste en tres ruedas que giran libremente espaciadas a intervalos iguales alrededor de la circunferencia de un círculo. En la figura 3.9 se muestra una forma motorizada en la cual las tres ruedas pueden impulsarse por medio de engranes reductores desde una rueda central de engranes. Al entrar en contacto con la superficie de un escalón (figura 3.9(a)), las fuerzas de fricción provocan que la rueda 1 interrumpa su rotación y, como resultado, el marco gira en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj sobre el eje de la rueda 1. En la figura 3.9(b) la rueda 3 hace contacto con la parte superior del escalón. En la figura 3.9(c) se muestra cómo la rueda 3 gira sobre la parte superior del escalón, mientras que la rueda 1 gira ascendiendo por la parte delantera del escalón. Un robot móvil, el TO-ROVER, con cuatro ruedas como las descritas, se usa para la inspección y la reparación de plantas de energía nuclear y lo han descrito Takano y Odawara (1981). Pero mientras que la rueda mostrada en la figura 3.9 depende de la fricción para la rotación del cuadro, el TO-ROVER utiliza un tacogenerador para detectar el momento en que la rueda 1 se ha detenido (figura 3.9(a)) y después, impulsa una rotación del marco de  $120^\circ$  en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj.

Los vehículos con orugas, como los tanques, también son capaces de subir escalones, pero pueden impactar el suelo con una fuerza considerable cuando el cuerpo gira después de superar un obstáculo. Este impacto se reduce hasta cierto punto en el robot bombero (Takata y Kishimoto (1977)), en el cual, mediante la instalación de resortes en sentido horizontal en los ejes delantero y trasero, la banda de rodamiento puede flexionarse a lo largo y puede, por lo tanto, absorber el impacto. Thring (1982) muestra varias formas de eliminar estos impactos. En una de ellas, cada elemento en forma de T de la banda de rodamiento funciona como una pata. Al acercarse a un escalón, el extremo delantero de la banda actúa como una rueda escalonada.

Además de poder escalar obstáculos, el vehículo con orugas puede desplazarse sobre terrenos suaves que resultarían impasables para un vehículo común. Esto lo logra distribuyendo la carga sobre un área grande. Cuando se realiza un desplazamiento sobre terrenos suaves es necesario mantener la presión de contacto por debajo de  $100 \text{ kN/m}^2$ . Las presiones de contacto varían desde alrededor  $41 \text{ kN/m}^2$  en el caso de los tractores agrícolas, hasta  $170 \text{ kN/m}^2$  en el caso de las excavadoras móviles. Para dar una idea de esta magnitud, un elefante adulto ejerce una presión de aproximadamente  $80 \text{ kN/m}^2$  sobre el piso (Hutchinson, 1967).

### 3.6 Máquinas caminantes

Las máquinas caminantes o andantes ofrecen varias ventajas sobre los vehículos comunes con ruedas. Mientras que las ruedas deben restringirse a superficies uniformes comparativamente planas, los vehículos con patas pueden atravesar terrenos dispares con un mínimo de balanceos y sacudidas. Son capaces de maniobrar en espacios confinados dentro de edificios y de subir escaleras y transportar cargas pesadas sobre terrenos suaves. Es por ello que actualmente existe gran interés en el diseño de máquinas caminantes para ayudar a personas incapacitadas y para destinarlas a usos industriales, agrícolas y militares. Su complejidad mecánica y sus problemas de control han restringido hasta ahora los desarrollos al laboratorio pero, a pesar de ello, son muchas las ventajas que pueden obtenerse de ellas y la investigación continúa.

#### *Secuencias de pisadas*

Con el fin de ilustrar la complejidad de las máquinas caminantes comencemos por examinar las posibles variaciones dentro de una secuencia de pisadas, incluyendo el movimiento simultáneo de dos o más patas.

Para una máquina de una sola pata existe claramente una sola secuencia: el salto (no se ha considerado el movimiento de locomoción del caracol

ni de las serpientes). Para un bípedo, como es el caso del ser humano, existen dos secuencias posibles: el salto sobre dos piernas (carrera de sacos) y la caminata o carrera, en la cual las piernas funcionan en forma secuencial.

Si las piernas se numeran como 1 y 2, podemos describir estas secuencias como (1 - 2) y (1, 2) respectivamente, en donde un guión entre los números indica un funcionamiento simultáneo y una coma indica un funcionamiento secuencial.

Usando esta notación pueden listarse seis secuencias posibles de funcionamiento de las patas en el caso de un trípodo:

1-2-3	— salto con tres patas
$\left. \begin{array}{l} 1, 2-3, \\ 2, 1-3, \\ 3, 1-2, \end{array} \right\}$	— dos patas que se mueven como una
$\left. \begin{array}{l} 1, 2, 3, \\ 2, 1, 3, \end{array} \right\}$	— una pata por vez: debe notarse que (3, 1, 2) y (2, 3, 1) son idénticos a (1, 2, 3) ya que a lo largo de una serie de ciclos el orden de funcionamiento de las patas es el mismo.

Para los cuadrúpedos existen 26 secuencias posibles para el funcionamiento de las patas. La primera (1-2-3-4) es el salto sobre cuatro patas y en la cual la acción es parecida al de una máquina con una sola pata. Las otras secuencias se enumeran en la tabla 3.1. Bessonov y Umonov (1976) han usado métodos combinados para determinar el número de secuencias de movimiento de las patas para cualquier número de patas. Sus resultados, hasta para 10 patas, se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.1

<i>Funciona efectivamente como bípedo</i>	<i>Funciona efectivamente como trípodo</i>	<i>Cuadrúpedo</i>
1, 2-3-4,	1, 2, 3-4,	1, 2, 3, 4,
2, 1-3-4,	1, 3, 2-4,	1, 2, 4, 3,
3, 2-1-4,	1, 4, 2-3,	1, 3, 2, 4,
4, 1-2-3,	2, 3, 1-4,	1, 3, 4, 2,
1-2, 3-4,	2, 4, 1-3,	1, 4, 2, 3,
1-3, 2-4,	3, 4, 1-2,	1, 4, 3, 2,
1-4, 2-3,		

Tabla 3.2

<i>Número de patas</i>	<i>Número de secuencias</i>	<i>Número de secuencias que potencialmente presentan estabilidad estática</i>
1	1	0
2	2	0
3	6	0
4	26	6
5	150	114
6	1082	1030
7	9366	9295
8	94586	94493
9	1091670	1091552
10	14174522	14174376

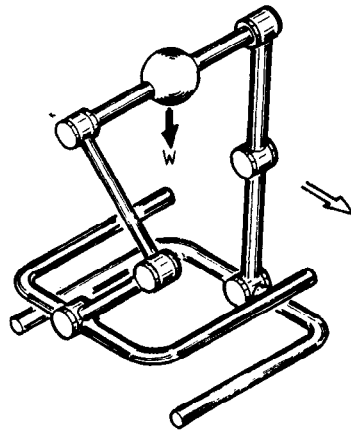
### ***Estabilidad***

En la última columna de la Tabla 3.2 se enumeran las secuencias potencial y estáticamente estables. Un paso estáticamente estable es aquél en el cual el centro de gravedad está siempre contenido dentro del área encerrada por las patas de soporte. Para lograr una estabilidad estática es necesario por lo tanto que cuando menos tres patas estén siempre en contacto con el piso. Esto a su vez requiere que una máquina andante estáticamente estable tenga al menos cuatro patas, es decir, tres patas que le sirvan de apoyo mientras la cuarta se levanta y se hace avanzar. En la tabla 3.2 se muestra que existen seis secuencias cuadrúpedas que satisfacen este requerimiento: en cada una de las seis solamente se mueve una pata por vez. Sin embargo, aun cuando las seis proporcionan tres bases para apoyo, se verá más adelante que sólo tres de ellas dan por resultado pasos que contienen siempre el centro de gravedad dentro de la zona de apoyo.

Los animales y las máquinas de una, dos y tres patas no pueden ser estáticamente estables. La máquina de una sola pata, o bastón saltarín, debe mantenerse constantemente en movimiento ya que de lo contrario, se cae. Raibert y Sutherland (1983) describen una máquina que salta sobre una sola pata y se mueve como si fuera un canguro a través de una serie de saltos.

Básicamente, la máquina logra una estabilidad dinámica al saltar en la misma dirección en que se inclina. Así, aun cuando es estáticamente inestable, puede ser al mismo tiempo dinámicamente estable.

Napier (1967) describe la marcha humana como una actividad única durante la cual el cuerpo, paso a paso, vacila al borde de una catástrofe. El



**Figura 3.10** Un mecanismo andante con dos patas.

movimiento rítmico hacia adelante moviendo primero una pierna y después la otra, evita que caigamos de golpe. Al igual que el bastón saltarín, aun cuando somos estáticamente inestables, no dejamos de ser dinámicamente estables. Varios investigadores (Vukobratovic, 1973; Ogo y colaboradores, 1978) han tratado de reproducir esta estabilidad dinámica en máquinas andantes bípedas, pero su limitado éxito ha requerido recurrir a complejas fórmulas matemáticas y poderosas computadoras. Es interesante destacar, sin embargo, el sencillo dispositivo mecánico (figura 3.10) que se emplea en los juguetes, que usa pies de gran tamaño para asegurar una estabilidad estática en todo momento. El diseño asegura que las extensiones laterales de cada pie eviten chocar unas con otras cuando se hace avanzar uno de los pies.

### ***Marcha***

McGhee y Jain (1972) definen la marcha como la trayectoria característica de las pisadas. Hay mucho más en una marcha que la simple secuencia de pisadas que se discutió anteriormente: también debe considerarse la duración de cada fase de la secuencia. Tanto la secuencia como la duración pueden tomarse en cuenta si la marcha se define en forma matricial (McGhee, 1968). Si el estado elevado de un pie se designa por un 1 y el estado de asentamiento por un 0, entonces es posible construir una matriz que muestre el estado de todas las patas en todas las fases a través de todo el ciclo de una marcha.

Por ejemplo, la matriz de la marcha para el caminar de un bípedo se construye de la siguiente manera:

	Pata 2	Pata 1	
Fase 1	0	0	$\equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
Fase 2	0	1	
Fase 3	0	0	
Fase 4	1	0	

Al inicio de la fase 1, ambas patas están apoyadas sobre el piso; en la fase 2 se levanta la pata 1; en la fase 3 la pata 1 se apoya nuevamente de manera que ambas patas están sobre el piso; en la fase 4 se levanta la pata 2 y se regresa a la fase 1 cuando la pata 2 se apoya nuevamente.

Existen cuatro eventos en el caminar de un bípedo, dos levantamientos y dos asentamientos, y es por ello que la matriz del paso tiene cuatro renglones. El hecho de que sólo cambie un numeral al pasar de un renglón al siguiente prueba que estos eventos son distintos e independientes dentro de la marcha. Considérese, por otro lado, la matriz de marcha para el salto sobre dos patas:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

En este caso, los levantamientos y asentamientos ocurren en forma simultánea de manera que son dos los numerales que cambian al pasar de un renglón al siguiente. Esta marcha se conoce como marcha singular (McGhee, 1968). Las marchas como la de los bípedos, en las cuales no ocurre el levantamiento y asentamiento simultáneo de los pies, se denominan no singulares.

En general, puede demostrarse (McGhee, 1968) que existen  $(2n - 1)!$  marchas no singulares para una máquina con  $n$  patas. Para  $n = 2$ , las seis marchas son las siguientes:

$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)

La marcha (a) es la de los bípedos y el (b) corresponde a la carrera en donde existen ocasiones en las que ambos pies están levantados del piso. Las marchas (c) y (d) los usan algunas veces los niños en sus juegos, especialmente al imitar el galope de los caballos. Las marchas (e) y (f) no se encuentran en la naturaleza.

Para el caso de los cuadrúpedos, se vio antes que existen 26 secuencias posibles distintas para el movimiento de las patas y, de ellas, en 20

hay el movimiento simultáneo de dos o más patas. Por lo tanto, las seis secuencias restantes forman la base de las marchas cuadrúpedas no singulares. Existen  $7! = 5040$  marchas cuadrúpedas no singulares, cada una de las cuales involucra ocho fases: cuatro levantamientos y cuatro asentamientos.

Por ejemplo, la matriz de marcha para el galope de un caballo basada en la secuencia (1, 3, 4, 2) es (véase la figura 3.11 en cuanto a la numeración de las patas):

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La pata 1 se apoya al inicio de la fase 1, la pata 3 en la fase 4, la pata 4 en la fase 5 y la pata 2 en la fase 7. Debe notarse que siempre hay más de una pata levantada en un momento dado. En realidad, durante la fase 3 el caballo vuela al tener las cuatro patas levantadas del piso.

El gran número de marchas no singulares se reduce drásticamente si se exige, con el fin de mantener la estabilidad estática, que tres patas estén en el piso en cualquier momento dado. Esta limitación reduce el número de marchas cuadrúpedas a seis (conocidas como marchas reptantes) con las secuencias:

- (a) 1, 2, 4, 3,      (b) 1, 3, 4, 2,      (c) 1, 4, 2, 3,  
(d) 1, 2, 3, 4,      (e) 1, 3, 2, 4,      (f) 1, 4, 3, 2,

Por ejemplo, la matriz de marcha para el gateo de un cuadrúpedo (secuencia (c)), es:

$$\begin{array}{c} \text{tiempo/T} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{array}{l} t_1 = 0 \\ t_4 - (1 - \beta) \\ t_4 \\ t_2 - (1 - \beta) \\ t_2 \\ t_3 - (1 - \beta) \\ t_3 \\ \beta \end{array} \end{array}$$

Lo anterior demuestra que el gateo del cuadrúpedo alterna entre posturas en tres y en cuatro patas.

La estabilidad de una marcha no puede determinarse sólo a partir de la matriz de marcha; también debe conocerse el momento en el cual se inicia cada fase. En la discusión que se incluye a continuación nos limitaremos a marchas regulares en las cuales todas las patas pasan el mismo tiempo sobre el piso. El factor de trabajo  $\beta$  se define como la cantidad de tiempo, como proporción del periodo  $T$ , que una pata permanece sobre el suelo. De aquí que en una marcha regular todas las patas tengan los mismos factores de trabajo.

$t_j$  es el tiempo normalizado con respecto al periodo  $T$ , en el cual la pata  $j$  se apoya. Se debe notar que transcurre un intervalo  $(1 - \beta)T$  entre el levantamiento de un pie y su asentamiento.

Hasta el momento la discusión se ha restringido solamente a marchas regulares. Ahora se añadirá una restricción adicional al requerir, como lo hace la naturaleza, que las marchas sean simétricas, es decir, que el movimiento de una pata derecha ( $j$ )(non) esté desfasado medio periodo con respecto a la pata izquierda correspondiente ( $j + 1$ )(par). Por lo tanto, para el gateo de un cuadrúpedo

$$t_2 = t_1 + 0.5 \quad \text{y} \quad t_3 = t_4 + 0.5$$

Si se selecciona  $t_1 = 0$ ;  $t_4 = 0.25$ ;  $\beta = 11/12$ , se llega a la progresión mostrada en la figura 3.11. En este diagrama es importante distinguir entre paso y marcha. Un paso se define aquí como la distancia que el animal o la máquina avanza mientras una pata dada está en contacto con el suelo. El tranco es la distancia que se avanza durante un ciclo completo de una marcha en particular. La relación entre paso y tranco puede determinarse de la siguiente manera: si la máquina avanza a una velocidad constante  $V$  entonces, como cada pata está en el suelo un tiempo  $\beta T$ , la máquina avanzará  $\beta TV$  mientras se apoya un pie, es decir, el paso  $S$  es  $\beta TV$ . Por otra parte, el tranco  $L$ , tiene una longitud  $TV$ . Por lo tanto, el tranco  $L = S/\beta$ .

Así, en la figura 3.11, el tranco =  $(12/11)$  veces el paso. En la figura se muestra que la pata 1 se apoya en  $t_1 = 0$ . La pata 4, entonces, se levanta en  $2T/12$  cuando la máquina se ha movido  $L/6$  hacia adelante. La pata 4 se apoya de nuevo en  $3T/12$  cuando la máquina ha llegado al punto  $L/4$  y así sucesivamente. Los apoyos alternativos entre tres y cuatro patas y un análisis de la figura muestran que el centro de gravedad está siempre dentro de la base suministrada por las patas de apoyo. La máquina es siempre estáticamente estable durante esta marcha. Se ha demostrado (McGhee y Frank, 1968) que esta estabilidad es óptima para esta marcha cuando  $\beta = 11/12$ ,  $t_1 = 0$ ,  $t_4 = 5/12$ ,  $t_2 = 1/2$ ,  $t_3 = 11/12$  y, con la

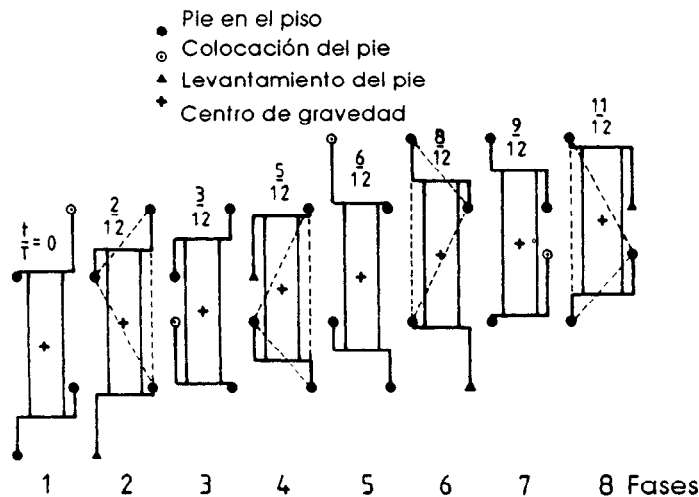


configuración de la figura 3.11, cuando el paso es el doble de la distancia axial entre el centro de gravedad y el punto de fijación de la pata.

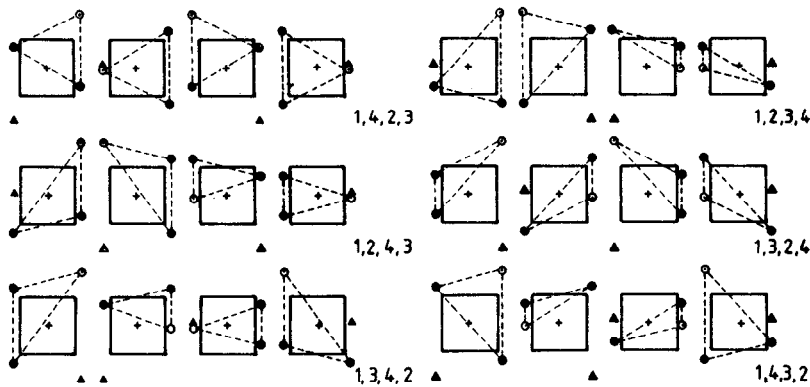
Para una marcha de gateo regular, que requiere que cuando menos tres patas estén sobre el suelo en un momento dado, el valor mínimo del factor de trabajo es 0.75. Una marcha con un valor menor de  $\beta$  tendrá momentos en los que solamente habrán dos patas sobre el suelo. En la figura 3.12 se muestra el patrón de pisadas para las seis marchas reptantes de los cuadrúpedos. Solamente se muestran las fases 1, 3, 5 y 7, ya que para  $\beta = 0.75$ , las otras, 2, 4, 6 y 8 tienen una duración de cero cuando las cuatro patas se apoyan sobre el piso. El avance hacia adelante de la máquina no se muestra en la figura ya que, para la determinación de la estabilidad, sólo es necesario conocer la posición de las patas en relación al centro de gravedad.

Un examen del diagrama muestra que, para  $\beta = 0.75$ , la secuencia de gateo (1, 4, 2, 3) es la única marcha estable e incluso sólo marginalmente en las fases 1 y 3. Sin embargo, la figura 3.11 muestra cómo se puede estabilizar esta marcha al incrementar el valor de  $\beta$  a 11/12. Lundstrom (1976) ha demostrado que las marchas (1, 3, 4, 2) y (1, 2, 4, 3) son estables si  $\beta > 5/6$  pero los otros tres pasos son estables sólo si  $\beta = 1$ , el cual es un ideal imposible de realizar.

Puede lograrse una mayor estabilidad al aumentar el número de patas. Por ejemplo, los insectos pueden mover sus seis patas en 1082 secuencias diferentes (Bessonov y Umnov, 1976) y 1030 de estas secuen-



**Figura 3.11** Progresión de una máquina andante con cuatro patas (secuencia 1, 4, 2, 3).



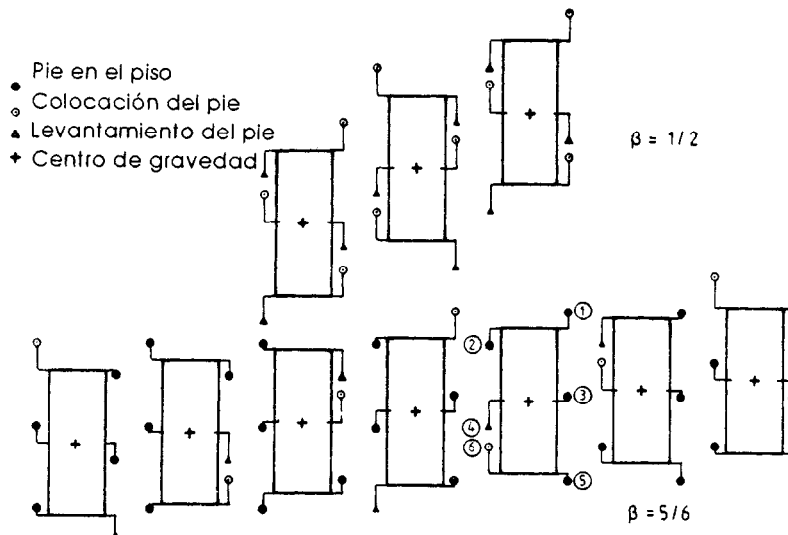
**Figura 3.12** Patrones de pisada para las seis marchas reptantes de un cuadrúpedo.

cias son potencialmente estables. Sin embargo, el requerimiento de simetría del movimiento reduce este número a 24. Dos de las secuencias se ilustran en la figura 3.13. La primera figura 3.13(a) muestra la llamada marcha trípode, en la cual tres patas se mueven al mismo tiempo (1-4-5, 2-3-6) y la máquina descansa siempre en forma estable sobre un trípode. Esta es, por supuesto, una marcha singular. La figura 3.13(b) ilustra la marcha singular de un hexápodo, basado en la secuencia (2, 5, 3, 1, 6, 4). Esto se conoce como marcha ondulada, es decir, una marcha en la que las patas adyacentes se mueven en forma sucesiva. Estas marchas son particularmente estables. Al consultar la figura 3.11, en la que se muestra el gateo cuadrúpedo, se confirma que éste es también una marcha ondulada (3, 1, 4, 2).

### 3.7 Energía consumida durante el desplazamiento

La naturaleza favorece dos tipos principales de configuraciones de patas: el tipo humano y el tipo arácnido. En el primero, la articulación de la rodilla está situada por debajo de la articulación de la cadera, mientras que en el segundo la articulación de la rodilla está situada en forma lateral o por encima de la articulación de la cadera. Se ha argüido (Hirose y Umetani, 1978) que la pata de tipo arácnido ofrece mayores posibilidades para los vehículos a campo traviesa ya que puede extender su pie dentro de un amplio rango, no solamente hacia adelante y hacia atrás, sino también hacia arriba y hacia abajo sobre la articulación de la cadera. Esto le permite rodear fácilmente los obstáculos. Además, bajo condiciones similares, la pata tipo araña consume menos energía que la del tipo humano.

Calculemos la energía consumida por una pata del tipo araña. Al hacerlo debemos distinguir entre trabajo útil y trabajo disipativo. Cuando



**Figura 3.13** Dos marchas hexápodas: marcha de trípode y marcha ondulada.

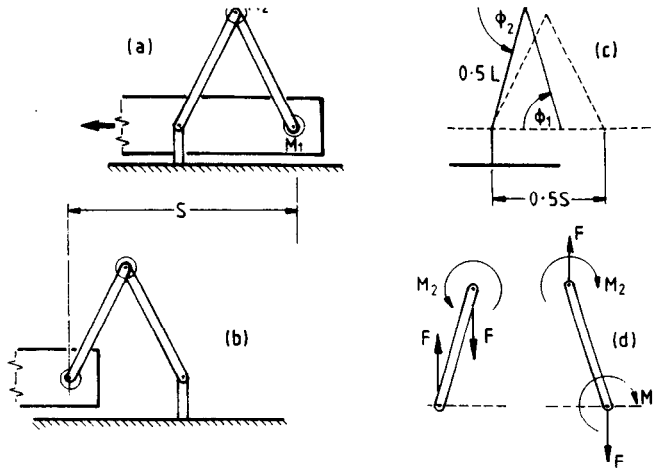
la fuerza suministrada por un actuador actúa en la misma dirección de su desplazamiento, el trabajo realizado es positivo. Por otro lado, cuando la fuerza y el desplazamiento se dan en direcciones opuestas, el trabajo realizado es negativo y en muchos sistemas de ingeniería esta forma de energía debe disiparse. Por ejemplo, en los sistemas hidráulicos, esto se realiza forzando aceite a alta presión de regreso al tanque a través de una válvula de liberación de presión.

En la figura 3.14 se muestra una pata del tipo araña con patas superiores e inferiores de igual extensión  $0.5L$ . Se supone que la pata tarsiana, que es la que lleva el pie, permanece vertical en todo momento. Los actuadores giratorios en la cadera y la rodilla generan los pares  $M_1$  y  $M_2$  respectivamente. En las figuras 3.14(a) y (b) se muestra la configuración de la pata al inicio y a la terminación de un paso con una extensión  $S$ . Las direcciones positivas de las variables angulares  $\phi_1$  y  $\phi_2$  se definen en la figura 3.14(c). La figura 3.14(d) es un diagrama de cuerpo libre que muestra las fuerzas y momentos que actúan sobre las patas superiores e inferiores. Para una mayor simplicidad se ha ignorado la fricción entre los pies y el suelo: la reacción del piso  $F$  es por lo tanto vertical. Suponiendo una velocidad constante e ignorando la masa de las patas, puede escribirse

$$\text{pata inferior: } M_2 - 0.5FL \cos \phi_2 = 0 \quad (3.1)$$

en donde  $M_2$  es el par aplicado por el actuador de la rodilla.

$$\text{pata superior: } M_1 + M_2 + 0.5FL \cos \phi_1 = 0 \quad (3.2)$$



**Figura 3.14** Fuerzas y momentos durante una caminata lenta: (a) inicio de un paso con una pata tipo araña; (b) terminación del paso; (c) diagrama geométrico; (d) fuerzas estáticas y pares.

en donde  $M_1$  es el par aplicado por el activador de la cadera. Ahora,  $\phi_1 = \phi_2$  y, por lo tanto, de (3.1)

$$M_2 = 0.5FL \cos \phi_2 \quad (3.3)$$

y de (3.2)

$$M_1 = -FL \cos \phi_1 \quad (3.4)$$

La energía consumida para llevar la pata a la perpendicular es

$$\text{motor 2 (rodilla): } E_2 = \int_{\phi_{20}}^{\pi/2} M_2 d\phi_2 = 0.5 FL(1 - \sin \phi_{20}) \quad (3.5)$$

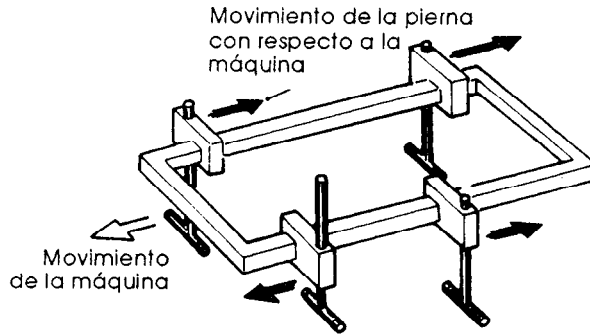
en donde  $\phi_{20}$  es el valor inicial de  $\phi_2$ ,

$$\text{motor 1 (cadera): } E_1 = \int_{\phi_{10}}^{\pi/2} M_1 d\phi = -FL(1 - \sin \phi_{10}) \quad (3.6)$$

De esta forma, el motor en la rodilla realiza un trabajo positivo útil, mientras que el motor en la cadera realiza un trabajo disipativo mientras levanta la pata a la posición vertical. Esta situación se invierte durante el resto del paso.

Como la fuente de poder debe suministrar solamente el trabajo positivo total durante un ciclo, entonces

$$E = 1.5FL(1 - \sin \phi_{20}) \quad (3.7)$$



**Figura 3.15** Actuadores independientes para la propulsión y el levantamiento de las patas.

en donde

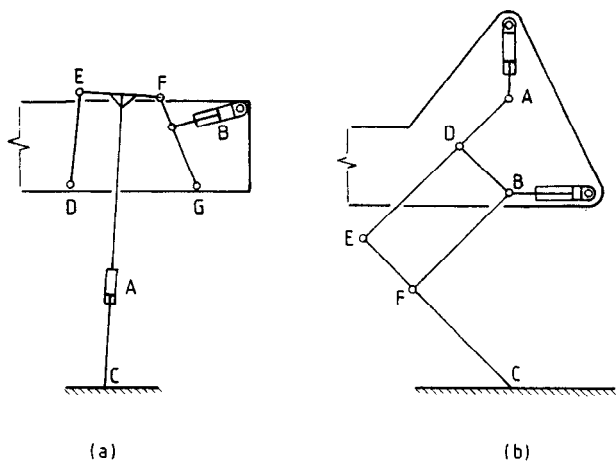
$$\sin \phi_{20} = (1 - 0.25(S/L)^2)^{0.5} \quad (3.8)$$

Así, la energía requerida varía de un mínimo de 0 en un paso con una extensión 0, a un máximo de  $1.5FL$  en el tranco máximo de  $S = 2L$ . Por ejemplo, para un vehículo de 1000 kg con  $S = L = 1$  m, se requieren aproximadamente 12.5 kJ de energía para impulsar las patas. Si la velocidad sobre el suelo fuera de 1 m/s entonces los motores tendrán que generar 12.5 kW, sólo para soportar el peso del cuerpo. Se requerirá energía adicional para mover las patas.

En este mecanismo en particular, el movimiento de los pies en línea recta se logra por medio de dos actuadores que trabajan en forma opuesta uno del otro. Hunt (1982) fue uno de los primeros en reconocer que esto podría evitarse usando actuadores independientes para la propulsión y para levantar las patas. Lo anterior puede lograrse mediante el empleo de actuadores ortogonales (figura 3.15). Debe notarse que para obtener una mayor estabilidad los pies son alargados en la dirección que forma ángulos rectos respecto a la dirección del movimiento. Como se mostró anteriormente (figura 3.10) este dispositivo se ha usado para estabilizar máquinas bípedas.

En la figura 3.16 se muestran otros dos métodos para separar la propulsión y el levantamiento de las patas. En (a), con el actuador A bloqueado, el pie C es parte del acoplador del mecanismo de cuatro barras DEFG (capítulo 2) y para la forma geométrica dada, parte de la curva de acoplamiento para C es casi una línea recta (Hunt, 1982). El actuador B impulsa la máquina hacia adelante y regresa el pie; el actuador A levanta y apoya el pie.

En la figura 3.16(b) encontramos de nuevo el mecanismo de pantógrafo que se analizó en el capítulo 2. Los actuadores horizontales y



**Figura 3.16** Otros medios de separar la propulsión y la elevación de las patas:  
 (a) usando un mecanismo de cuatro barras *DEFG*;  
 (b) usando un pantógrafo.

verticales en *B* y *A* guían el pie sobre una ruta rectangular con respecto al vehículo (Taguchi y colaboradores, 1976).

Sin embargo, a pesar de su bajo consumo de energía, no debe olvidarse que las patas articuladas son más maniobrables que las ortogonales y esto puede ser de vital importancia en muchas aplicaciones.

### 3.8 Problemas de control

Una vez decidido el diseño de pata en particular y el medio de impulso, el siguiente paso es seleccionar un sistema de control que regule la marcha seleccionada. Esta es una tarea relativamente sencilla si el terreno es plano y uniforme. Sin embargo, si existe la presencia de obstáculos, una máquina autónoma debe contar con algún medio para detectarlos y ajustar la extensión y altura del paso en forma congruente. También será necesario asegurar que al evitar dichos obstáculos la máquina permanezca siempre en una configuración estáticamente estable. Si no lo hace, es posible que sea necesario dar la vuelta al obstáculo, en lugar de pasar por encima de él, en cuyo caso la máquina también tendrá que ser capaz de conducir por sí misma. Y, además, con el fin de lograr una comodidad adecuada será deseable mantener el cuerpo con una orientación constante durante dichas maniobras.

Estas tareas de control son formidables y es solamente hasta ahora, cuando se cuenta con el poder del microprocesador, que los ingenieros han comenzado a enfrentarlas con optimismo (McGhee, 1978; McGhee e Iswahdhi, 1979; Bessonov y Umnov, 1983).

### 3.9 Resumen

Se ha visto que un robot tiene muchas características antropomórficas. Al igual que el ser humano, necesita muñecas, manos y dedos para poder manipular objetos. Existen también aplicaciones en las que el robot necesita contar con patas para tener movilidad.

Una muñeca requiere tres grados de libertad angular; inclinación vertical, inclinación horizontal y rotación. Son posibles diversas configuraciones mecánicas de los tres motores impulsores, cada uno con ventajas y desventajas particulares.

Las tenazas se clasifican en tres categorías principales, basadas en mecanismos, imanes y vacío. Aun cuando estas tenazas están diseñadas para levantar objetos con características geométricas relativamente bien definidas, las tenazas universales y, óptimamente, las manos mecánicas han demostrado ser mucho más versátiles.

La movilidad puede suministrar a un robot tres grados de libertad adicionales. Se ha argüido que la rueda, con sus muchas ventajas, está limitada a superficies relativamente planas; mientras que las ruedas sin rines, las ruedas venecianas, los rieles y las máquinas andantes son capaces de avanzar por terrenos dispares. Las máquinas andantes son un avance particularmente interesante pero presentan muchos problemas difíciles de resolver, incluyendo la estabilidad, la selección de la marcha, el control y la maniobrabilidad. El consumo de energía es otro problema posible.





# Capítulo 4

## *Sistemas de accionamiento*

---

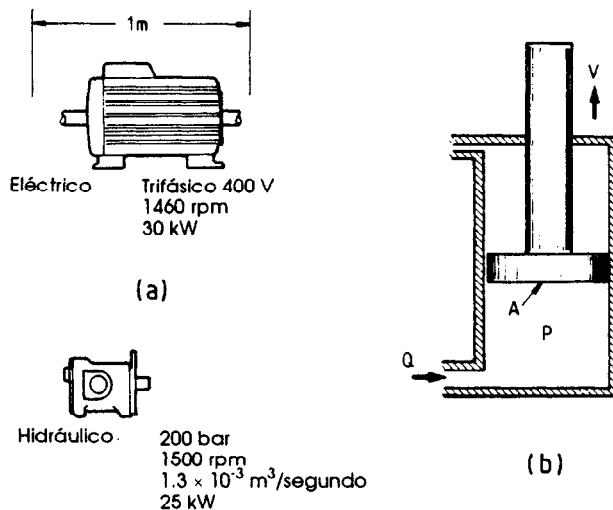
### **4.1 Introducción**

Los sistemas de accionamiento o impulso suministran al robot el poder muscular necesario. Son dispositivos para conversión de energía, que transforman una potencia eléctrica, hidráulica o neumática en una potencia mecánica. Los elementos básicos de accionamiento pueden clasificarse en motores y actuadores; los primeros son capaces de presentar rotación continua, mientras que los segundos están limitados en su movimiento, ya sea lineal o giratorio.

#### ***Accionamiento hidráulico***

Una de las principales ventajas del accionamiento hidráulico es la capacidad para generar fuerzas de gran magnitud, lo cual es posible dadas las elevadas presiones de trabajo de los actuales sistemas hidráulicos. No es raro encontrar presiones de hasta  $280 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  (280 bar); con un cilindro de accionamiento con un diámetro de solamente 2 cm, esta presión puede generar una fuerza de 8800 N. Algunas de las aplicaciones con fuerzas de mayor magnitud se encuentran en la industria que trata metales, en donde las forjas pueden aplicar fuerzas de hasta 3 MN.

La elevada relación fuerza-peso es otra importante ventaja del accionamiento hidráulico que resulta en particular atractiva en situaciones donde el peso es una característica fundamental de la actividad, como en el caso de aeronaves, misiles y robots. Los motores hidráulicos son mucho más pequeños que los motores eléctricos con la capacidad necesaria para generar la misma potencia (figura 4.1(a), atribuyéndose nuevamente las diferencias en cuanto a tamaño y peso a las elevadas presiones de trabajo



**Figura 4.1** (a) Comparación de un motor eléctrico y uno hidráulico; (b) cilindro hidráulico alimentado con aceite a un gasto  $Q$  y una presión  $P$ .

del sistema hidráulico. Se mencionó antes que 280 bar no es una potencia inusual en los sistemas hidráulicos: en comparación, el imán de un motor eléctrico puede aplicar una presión de tan sólo 17 bar aproximadamente. Este efecto de tamaño puede explicarse consultando la figura 4.1(b) en la cual se muestra un cilindro hidráulico al que se suministra aceite con un gasto de  $Q \text{ m}^3/\text{s}$  y a una presión de  $P \text{ N/m}^2$ . El pistón, con un área  $A \text{ m}^2$ , se mueve a una velocidad de  $V \text{ m/s}$ . Podemos relacionar la potencia con la presión y la velocidad de flujo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{potencia} &= \text{fuerza} \times \text{velocidad} \\
 &= (PA) \times V \\
 &= P \times AV \\
 &= P \times Q
 \end{aligned}$$

Así, para una potencia dada, un actuador hidráulico que trabaja a alta presión requiere una velocidad de flujo de aceite muy baja; y, por lo tanto, puede ser bastante pequeño.

La rigidez de un accionador hidráulico es otra ventaja importante. El aceite es, para fines prácticos, incompresible, lo que hace que los accionadores hidráulicos sean insensibles a alteraciones en la carga. Esta es otra razón más para su gran popularidad en las industrias aeroespacial y de maquinado. La elevada rigidez también permite lograr un control muy preciso.

Las ventajas de gran potencia, elevada relación peso/potencia, gran rigidez y facilidad de control son opacadas hasta cierto punto por varios problemas prácticos, siendo los más serios:

- Los sistemas hidráulicos son costosos: la precisión en manufactura debe ser alta para mantener distancias de separación muy pequeñas entre las partes fijas y las partes móviles. Esto es necesario si se desea minimizar las fugas (y desperdicios de potencia).
- Dado que existe la posibilidad de fugas, puede resultar poco conveniente usar sistemas hidráulicos en entornos donde la higiene es importante, por ejemplo, al tratar de alimentos.
- Es necesario contar con espacio para la tubería requerida por el sistema.

### ***Accionamiento neumático***

Los primeros sistemas neumáticos (véase McCloy y Martin (1980)) utilizaban aire como elemento de trabajo, pero en la actualidad en algunas aplicaciones se emplean gases inertes y gases calientes. Las presiones de trabajo están por lo general limitadas a 7.0 bar, aunque en el presente se están diseñando algunos sistemas para funcionar con 10 bar. La ineficiencia en la compresión de los gases y los peligros inherentes al almacenamiento de gases a alta presión hacen necesarias estas limitaciones.

El uso de aire comprimido como fuente de energía ha aumentado rápidamente durante los últimos 20 años y en la actualidad se acepta en todas las ramas de la industria. Sus ventajas, muchas de las cuales son compartidas por los sistemas hidráulicos, pueden resumirse de la siguiente manera:

- La mayoría de las plantas productivas tienen un suministro de aire comprimido a la mano.
- Los componentes neumáticos son poco costosos.
- Los componentes están siempre en existencia. La gama de válvulas es extensa y existe una gran variedad de tamaños de cilindros.
- Los componentes son confiables y su mantenimiento es sencillo y económico. El servicio por lo general puede llevarse a cabo en el campo, dado que solamente es necesario cambiar los sellos de las válvulas o los cojinetes de los cilindros.
- Los actuadores neumáticos no se queman cuando se atorán. Los actuadores hidráulicos también presentan esta ventaja.
- No existen riesgos de incendio cuando se emplea accionamiento neumático. Por ejemplo, pueden usarse en situaciones en donde el riesgo de una explosión impediría el uso de electricidad.

- El aire comprimido no es inflamable y, por lo tanto, el equipo neumático puede usarse bajo condiciones de alta temperatura en donde el uso de sistemas hidráulicos o eléctricos podría resultar peligroso o excesivamente costoso. La mayoría del equipo puede trabajar a temperaturas de hasta 80 a 90°C, pero puede tolerar temperaturas más elevadas si se emplean sellos resistentes al calor.
- Los sistemas neumáticos son limpios.

Por supuesto también existen ciertas desventajas asociadas a los sistemas neumáticos y es necesario considerarlas cuidadosamente antes de instalar equipo neumático:

- La producción de aire comprimido es costosa y esto debe tomarse en cuenta si la planta no cuenta todavía con una compresora. Desde el punto de vista de la potencia, ésta es considerablemente más costosa que la eléctrica o la hidráulica.
- Es difícil lograr una precisión adecuada de alimentación debido a la naturaleza elástica del aire comprimido. En este aspecto no puede competir con los sistemas hidráulicos o eléctricos.
- La transmisión de señales de aire a través de la tubería es mucho más lenta que la transmisión de señales eléctricas a través de cables. Por lo tanto, si los tiempos de señalización son críticos y las líneas son de gran extensión (más de 10 metros), deben utilizarse sistemas eléctricos.
- Los cilindros neumáticos ocupan gran cantidad de espacio y resultan costosos si se desea obtener potencias considerables. Pueden generarse potencias más grandes en forma más conveniente mediante el uso de sistemas hidráulicos.
- Los sistemas a base de aire comprimido pueden ser muy ruidosos.

### ***Accionamiento eléctrico***

La mayoría de las personas están más familiarizadas con la potencia eléctrica que con la potencia hidráulica, dado que la primera es la más común en los hogares y en la mayoría de los aspectos cotidianos. Con respecto a su aplicación a los robots, la energía eléctrica ofrece varias ventajas (Kafrissen y Stephans (1984)):

Los actuadores eléctricos son fáciles de controlar: proporcionan un rápido control de la posición y de la velocidad con un elevado nivel de precisión.

Se obtienen fácilmente y son poco costosos.

Es más fácil diseñar un sistema de cableado que uno de tubería.

Los actuadores eléctricos tienen un funcionamiento silencioso.

Los sistemas eléctricos son limpios.

Pero, nuevamente, como en todas las áreas tecnológicas, existen varias desventajas por considerar:

- Las relaciones potencia/peso y par/peso son reducidas.
- Los pares pequeños requieren una gran cantidad de engranes y, debido al juego, se provocan problemas de control adicionales.
- La generación de arcos provoca riesgos de incendio: los actuadores eléctricos están, por lo tanto, eliminados de ciertas tareas como la aplicación de pintura por aspersión.
- La posibilidad de sufrir descargas eléctricas representa un riesgo de seguridad.

### *¿Cuál sistema es el mejor?*

Las propiedades de los sistemas hidráulicos, neumáticos y eléctricos descritas anteriormente permiten llegar a ciertas conclusiones relativas al uso potencial de cada una de estas formas de actuadores en el campo de los robots. Primero, es necesario distinguir entre actuadores directos e indirectos (Ray, 1983). Los impulsores directos no tienen enlaces mecánicos entre el actuador y el eslabón del impulsor. Los cilindros y motores hidráulicos y neumáticos pueden usarse como actuadores directos debido a sus elevadas capacidades de generación de fuerzas y pares. Los directos tienen varias ventajas: son compactos, lo cual permite su instalación en las articulaciones de los robots; son sencillos y fáciles de mantener.

Los impulsores indirectos requieren una transmisión mecánica entre el actuador y el elemento impulsado, generalmente con el propósito de incrementar la fuerza y el par de salida. Estas transmisiones pueden adoptar la forma de engranes, tornillos sinfín, impulsores armónicos, bandas, cadenas, etc. La relación de engranes de los impulsores indirectos se encuentra generalmente en el rango de 50:1 a 100:1 y esto produce un sistema rígido, un sistema con transmisión de movimiento prácticamente unidireccional. Esta es una característica deseable en aplicaciones de maquinado y en aplicaciones que requieren movimientos rápidos a lo largo de distancias cortas. Los impulsores directos a base de potencia hidráulica muestran una cierta compresibilidad del fluido, característica particularmente en los sistemas neumáticos y ésta puede ser una desventaja en aplicaciones como las mencionadas. Los impulsores indirectos permiten el uso de servomotores de corriente directa, los cuales son silenciosos y eficientes.

Una de las principales desventajas del impulsor indirecto es el volumen y el costo de las transmisiones mecánicas asociadas. Además, el juego mecánico en estas transmisiones puede afectar la repetitividad y la estabilidad. Como las transmisiones están diseñadas para la reducción de velocidad de los motores eléctricos, los impulsores indirectos rara vez resultan adecuados para los robots de gran tamaño que requieren movi-

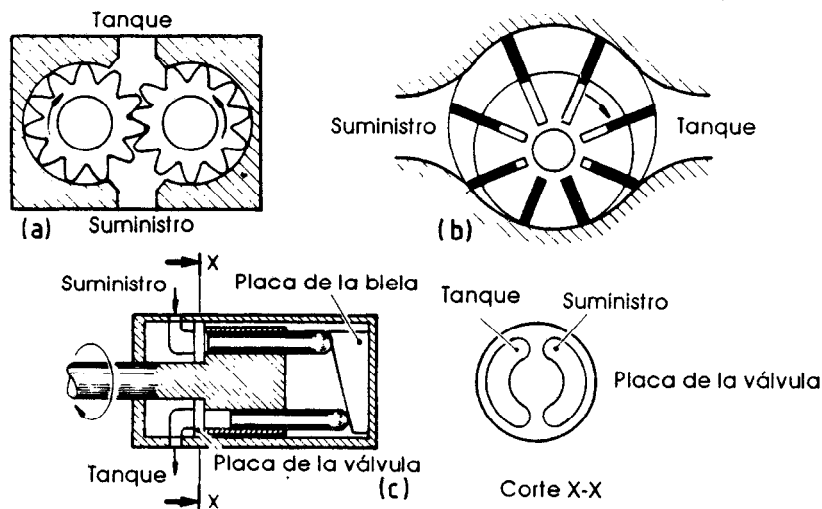
mientos a alta velocidad. Estos robots generalmente necesitan impulsores hidráulicos, mientras que los robots pequeños requieren impulsores indirectos eléctricos.

Ahora analizaremos con mayor detalle los impulsores a base de potencia hidráulica y los eléctricos; primero se verán los sistemas de potencia hidráulica.

## 4.2 Conversión de potencia hidráulica a potencia mecánica

A partir de la suposición de que se cuenta con una fuente de potencia hidráulica, el diseñador de un sistema robot enfrenta la tarea de idear un medio para controlar dicha potencia y de convertirla en potencia mecánica. Se considerará primero la última de estas tareas. Los motores y actuadores llevan a cabo funciones opuestas a las de las bombas y las compresoras, en cuanto a que reconvierten la energía hidráulica en energía mecánica de manera que pueda realizarse un trabajo útil.

Muchas bombas hidráulicas también pueden hacerse funcionar como motores. Los motores de engranes, de paletas y de pistones son los tipos más comunes en el mercado actual (figura 4.2). En su forma más simple, el motor hidráulico de engranes consiste de dos engranes rectos, generalmente con ocho o diez dientes, contenidos en una carcasa muy ajustada. El aceite a alta presión que ingresa ejerce un momento de rotación en ambas ruedas de engranes, aunque por lo general la potencia se obtiene sólo de una de ellas. El aceite se transporta alrededor de los dientes y se descarga

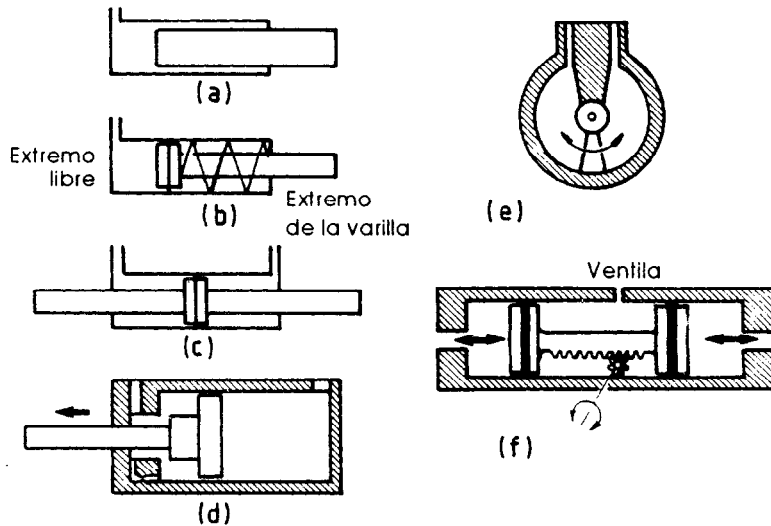


**Figura 4.2** Motores de potencia hidráulica: (a) motor de engranes; (b) motor de paletas deslizantes; (c) motor de pistones axiales.

en un tanque. Los motores de engranes pueden funcionar a presiones de hasta 200 bar y pueden generar potencias de hasta 100 kW.

Un motor hidráulico de paletas deslizantes se ilustra en la figura 4.2(b). El rotor ranurado cilíndrico tiene aspas con resortes que se proyectan en forma radial. Tienen suficiente libertad para moverse en las ranuras y se mantienen en contacto con la carcasa por medio de los efectos combinados de la acción centrífuga y la fuerza de resorte. El rotor está colocado en forma excéntrica dentro de la carcasa y esto permite que el aceite a presión entrante ejerza una fuerza neta sobre el rotor en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj. El aceite se desplaza alrededor de los espacios entre las aspas hasta llegar al puerto de descarga. Las presiones están, por lo general, limitadas alrededor de 70 bar.

Es usual que los motores de pistones utilicen pequeños pistones reciprocantes a alta velocidad. Estos motores se usan normalmente para presiones hidráulicas muy elevadas ( $>150$  bar). Existen muchos tipos distintos de motores de pistones, entre ellos, motores de émbolos, motores radiales y motores axiales; de éstos, sólo el último se ha de analizar en esta sección. El motor de pistones axiales se denomina así porque los pistones se desplazan sobre el eje longitudinal del cilindro (figura 4.2(c)). Conforme el pistón realiza un impulso hacia afuera, su contacto con la placa de la biela provoca la rotación del barril del cilindro. La placa de la válvula, con sus puertos en forma de riñón, está fija sobre el cuerpo del motor.



**Figura 4.3** Actuadores a base de fuerza hidráulica: (a) ariete; (b) cilindro de acción sencilla con retroceso de resorte; (c) cilindro de doble acción; (d) amortiguamiento; (e) accionador giratorio de aspas; (f) piñón y cremallera.

También existe una extensa variedad de motores neumáticos con potencias que van de 0 a 20 kW. Los motores de pistones son, por lo general, los preferidos en aplicaciones industriales en donde es esencial un fuerte par a baja velocidad. Los motores de aspas son populares para trabajos que requieren una potencia media ( $<12$  kW) y se utilizan en herramientas portátiles, tornos, bandas transportadoras, etc. Con los motores a base de pequeñas turbinas pueden lograrse velocidades muy altas. Por ejemplo, las lijadoras tipo lápiz pueden alcanzar velocidades de hasta 80 000 revoluciones/minuto impulsadas por estos motores y los taladros dentales pueden alcanzar hasta 700 000 revoluciones por minuto.

El actuador lineal más simple es el cilindro de acción sencilla o ariete, en el cual el fluido impulsa la varilla en una sola dirección (figura 4.3(a)). En algunos casos, la carrera de retroceso puede depender de la carga o de la fuerza de gravedad y, en otros, puede emplearse un resorte (figura 4.3(b)). Dado que el cilindro debe realizar trabajo contra el resorte, es muy común restringir el uso de retractores de resorte a aplicaciones donde se requieren carreras cortas, como en el caso de un atenazamiento. En algunos servomecanismos hidráulicos, la fuerza de retroceso se suministra por medio de una presión hidráulica constante aplicada en el extremo de la varilla.

Si se requiere un control positivo tanto durante la extensión como durante la retracción de la varilla del pistón, será necesario entonces utilizar un cilindro de doble acción (figura 4.3(c)). Este cilindro se impulsa generalmente con una válvula que puede elevar la presión en un extremo del pistón mientras que de manera simultánea reduce la presión en el otro extremo y viceversa. El cilindro que se muestra en la figura 4.3(c) es un cilindro de doble varilla cuya instalación requiere un espacio de cerca de tres veces la magnitud de su desplazamiento. Un cilindro de una sola varilla, como el que se presenta en la figura 4.3(b) también puede operarse con un doble accionamiento. Requiere un menor espacio y es, tal vez, el tipo más usado. Sin embargo, debido que el pistón tiene áreas distintas en cada uno de los lados, las fuerzas y velocidades alcanzadas durante la extensión y la retracción serán diferentes y, como resultado, el cilindro de doble varilla será el preferido para servosistemas que requieren un alto rendimiento.

En los robots neumáticos para el levantamiento y la colocación de piezas con frecuencia es necesario incluir un cojín de desaceleración al final de la carrera. Lo anterior ayuda a disipar con suavidad la energía cinética de la carga y reduce la posibilidad de daños mecánicos en el cilindro, en especial si se utilizan cilindros de acción rápida. En la figura 4.3(d) se ilustra el principio de funcionamiento. Conforme la varilla se desplaza hacia la izquierda, la espiga entra en la cámara de amortiguamiento y bloquea la ruta principal de escape del fluido. El fluido deberá forzar



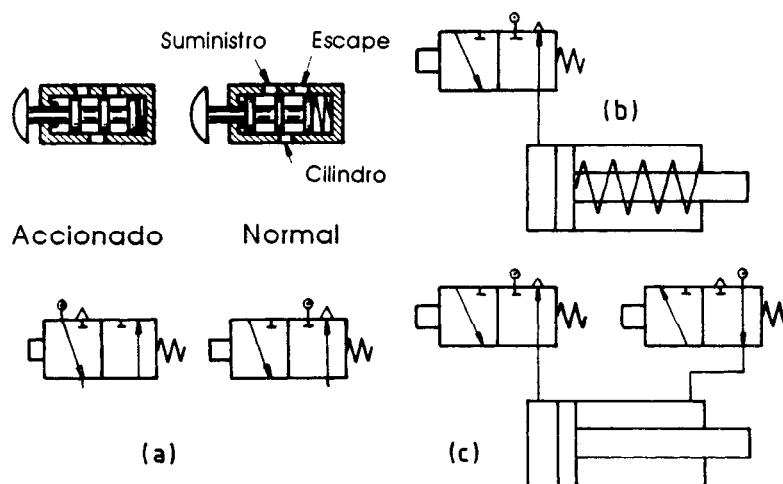
su paso a través de la válvula de aguja cuyo ajuste determinará el grado de desaceleración; de este modo la energía cinética de la carga se disipará en forma de calor. También es necesaria una válvula de bloqueo en los cilindros de doble acción de manera que, al invertirse el movimiento, la válvula se abra permitiendo un flujo sin restricción hacia el cilindro cuando la espiga se encuentre en la cámara de amortiguamiento.

Pueden emplearse diversas transmisiones para convertir el movimiento lineal generado en un movimiento giratorio. Sin embargo, existen algunos actuadores en el mercado que están específicamente diseñados para producir un movimiento giratorio restringido. Dos de ellos se muestran en la figura 4.3. El tipo de aspas (figura 4.3(e)) puede ser de acción única o de doble acción, pero la rotación generada está restringida aproximadamente a  $300^\circ$ . La configuración de cremallera y piñón de la figura 4.3(f) permite diversos tipos de rotación para el eje motriz.

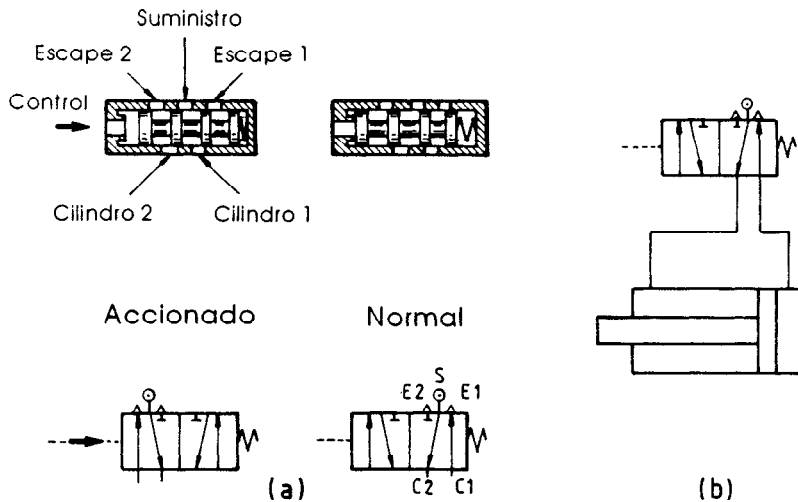
### 4.3 Válvulas de control de encendido-apagado

Estas válvulas consisten en dos o más puertos distribuidos y conectados de tal manera que una señal de control pueda *dirigir* el fluido a diversas partes de un sistema. Estas válvulas se clasifican de acuerdo con su diseño en cuanto al número de puertos que pueden interconectar.

Una válvula de tres puertos puede controlar el movimiento de un cilindro de acción simple (figura 4.4(b)). En la posición normal el cilindro está conectado al escape y el resorte mantiene la varilla en la posición



**Figura 4.4** Válvula de tres puertos: (a) accionada y normal; (b) controlando un cilindro de acción sencilla; (c) dos válvulas que controlan un cilindro de doble acción.



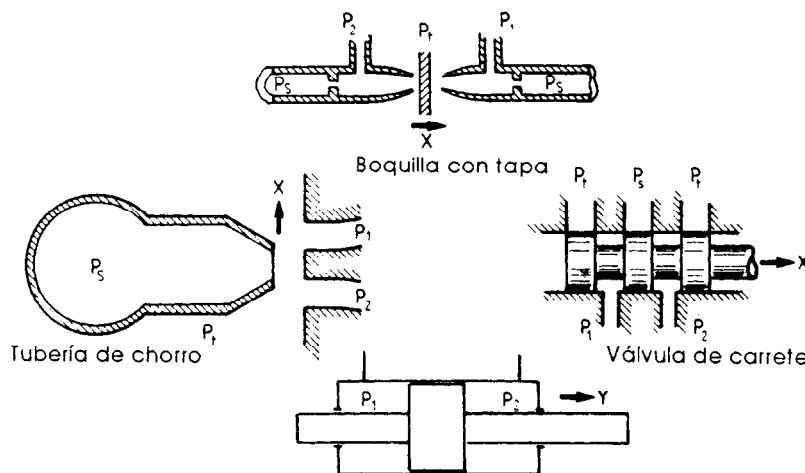
**Figura 4.5** Válvula de cinco puertos: (a) accionada y normal; (b) controlando un cilindro de doble acción .

retraída. El accionamiento de la válvula presuriza el cilindro e impulsa la varilla a su posición extendida. Este es el más sencillo de los controladores de encendido-apagado. Su uso puede extenderse a los cilindros de doble acción (figura 4.4(c)). En este caso se necesitan dos válvulas de tres puertos, colocadas de tal forma que cuando una de las válvulas presuriza un extremo del cilindro, la otra válvula despresuriza el otro extremo.

Una válvula de cinco puertos puede realizar el trabajo de estas dos válvulas de tres puertos. Esta válvula presuriza o despresuriza alternativamente los dos puertos del cilindro. En la figura 4.5(a) se muestra una válvula neumática de carrete con cinco puertos, dos posiciones (5/2), operada por medio de un piloto, con retroceso de resorte. Debe notarse que se requieren cuatro émbolos para asegurar el balance de las presiones estáticas en ambas posiciones. En la figura 4.5(b) se muestra el circuito para el control de encendido-apagado de un cilindro de doble acción.

#### 4.4 Servoválvulas

Las válvulas antes descritas se utilizan en aplicaciones en donde resulta adecuado el control de dos posiciones. En donde es absolutamente necesario un control proporcional preciso de la posición, la velocidad o la fuerza, es esencial contar con una servoválvula. Por definición, una válvula de dos posiciones controla dos posiciones de la varilla de un cilindro. El control continuo de la posición requiere válvulas capaces de asumir un número infinito de posiciones: estas válvulas se denominan servoválvulas.



**Figura 4.6** Servoválvulas: tubo de chorro, boquilla y de carrete.

En la figura 4.6 se muestra cómo se pueden utilizar tres tipos distintos de servoválvulas para impulsar un cilindro de doble acción.

En la válvula de boquilla, un movimiento positivo de la aleta  $x$  reducirá el tamaño del orificio de salida y aumentará el tamaño de la salida del lado izquierdo. La presión  $P_1$  aumentará y  $P_2$  disminuirá. El flujo pasará del puerto  $P_1$  de la boquilla al puerto  $P_1$  del cilindro y del puerto  $P_2$  del cilindro al puerto  $P_2$  de la boquilla y de ahí al tanque  $P_t$ .

La válvula de carrete y la válvula de boquilla ilustran respectivamente el uso de elementos de deslizamiento y de asentamiento. La tubería de chorro introduce un nuevo tipo de elemento de válvula cuya acción depende de la conversión de la presión dinámica de un chorro en presión estática en un accionador. Conforme el tubo de chorro se mueve en la dirección positiva  $x$ , la presión  $P_1$  aumenta y  $P_2$  disminuye.

Cada una de estas servoválvulas es capaz de impulsar un cilindro de doble acción. Existe, sin embargo, una importante diferencia entre el rendimiento de la válvula de carrete y las otras dos: la válvula de carrete se cierra al centro, es decir, los puertos del cilindro se bloquean cuando la válvula se encuentra en la posición media. Las válvulas de boquilla y de chorro permanecen abiertas en su porción central y, por lo tanto, no pueden sostener una carga tan rígidamente en una posición dada. Y, a diferencia de las válvulas de carrete, existe un flujo constante de fluido en la posición media, lo que representa una discreta pérdida de potencia. Esto tiende a restringir su uso en aplicaciones con un bajo nivel de potencia, generalmente con aire. Sin embargo, también presentan ciertas ventajas, incluyendo una tendencia a limpiarse solas y un costo bajo.

#### 4.5 Un modelo matemático

Un modelo matemático proporciona una útil perspectiva sobre el comportamiento de un actuador hidráulico. Con referencia a la figura 4.7 se puede establecer la siguiente ecuación aproximada:

velocidad de flujo de entrada a través de la válvula

$$Q_1 = k_1 x - k_2 P_1 \quad (4.1)$$

en donde  $k_1$  y  $k_2$  son coeficientes linearizados de la válvula. En realidad  $Q_1$  es no lineal con respecto a  $x$  (excepto cuando se utilizan puertos rectangulares) y a  $P_1$ . Sin embargo, un análisis linearizado puede darnos información muy útil. Suponiendo que la válvula es simétrica, la velocidad del flujo de salida a través de la válvula es

$$Q_2 = k_1 x + k_2 P_2 \quad (4.2)$$

Ahora, con respecto al lado izquierdo del cilindro, puede escribirse

$$Q_1 = A \frac{dy}{dt} + C \frac{dP_1}{dt} \quad (4.3)$$

o bien,

flujo de entrada = flujo desplazado + flujo de compresibilidad

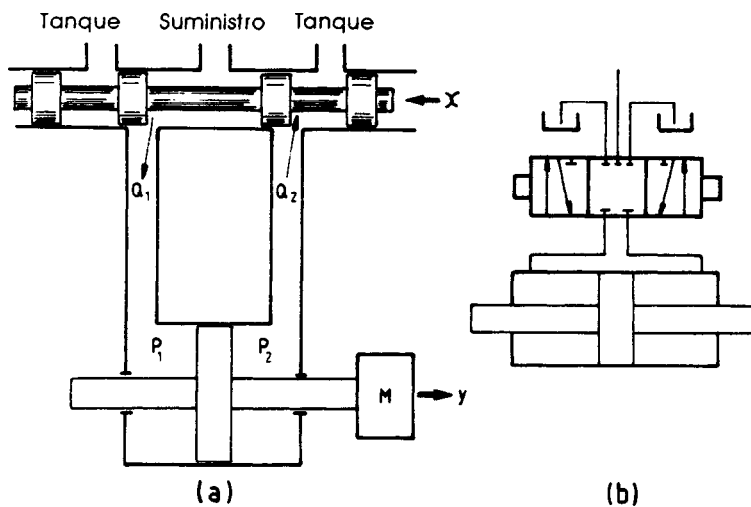


Figura 4.7 (a) Servoválvula y actuador; (b) diagrama de circuitos.

en donde  $A$  es el área del pistón y  $C$  es un factor de compresibilidad. El flujo de compresibilidad se presenta debido a que el fluido reduce su volumen bajo presión. De manera similar,

$$Q_2 = A \frac{dy}{dt} - C \frac{dP_2}{dt} \quad (4.4)$$

Por último, si la carga es una masa  $M$ , al aplicar la segunda ley de Newton se obtiene

$$A(P_1 - P_2) = M \frac{d^2y}{dt^2} \quad (4.5)$$

Estas ecuaciones se combinan para dar la función de transferencia

$$\frac{y}{x}(s) = \frac{2k_1A/CM}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (4.6)$$

la cual indica una respuesta potencialmente oscilatoria a las entradas en escalón.

La frecuencia natural es

$$\omega_n = A\sqrt{2/MC} \quad (4.7)$$

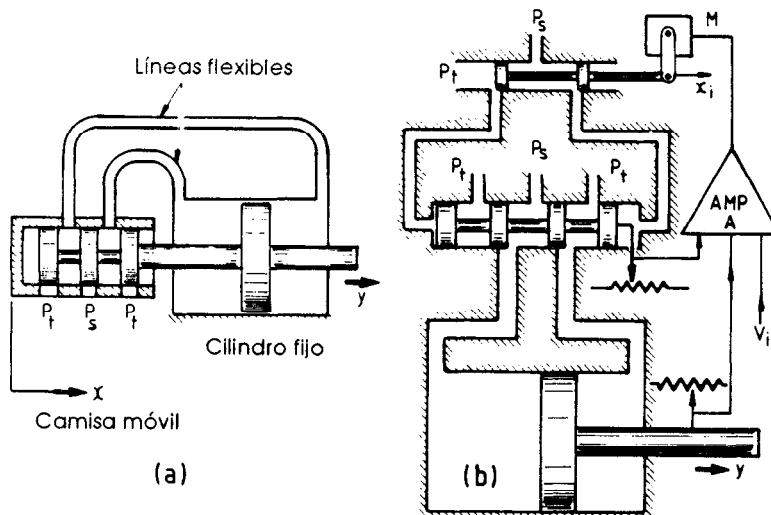
y la relación de amortiguamiento es

$$\xi = k_2/(2A\sqrt{2C/M}) \quad (4.8)$$

De aquí que la frecuencia natural de un actuador como éste sea máxima cuando el área del pistón  $A$  es elevada, cuando la masa de la carga es reducida y cuando la compresibilidad del fluido  $C$  es baja. El coeficiente de la válvula  $k_2$  tiene un efecto dominante sobre la relación de amortiguamiento.

#### 4.6 Servomecanismos hidráulicos

La potencia fluídica, en particular la hidráulica, se utiliza extensamente en dispositivos para control de posición o servomecanismos. Un servo hidráulico común se ilustra en la figura 4.8. La salida  $y$  sigue a la entrada  $x$ , pero con una amplificación de la fuerza. En un torno para copiado, por ejemplo, la entrada  $x$  será generada por un seguidor de plantillas y la salida  $y$  será



**Figura 4.8** Servos hidráulicos: (a) retroalimentación mecánica; (b) retroalimentación eléctrica.

la posición de la herramienta para la reproducción de la forma de la plantilla.

El servo electrohidráulico que se muestra en la figura 4.8(b) es más común en los sistemas robot, en donde el amplificador  $A$  suministra una interfase entre la computadora y el resto del sistema. En este caso, la válvula consiste en dos etapas y a la etapa piloto la impulsa un motor giratorio eléctrico  $M$ . Los movimientos del carrete piloto hacen variar la presión diferencial que actúa sobre los extremos del carrete principal y esto suministra fuerzas de impulso lo suficientemente grandes como para mover el rotor principal rápidamente contra las fuerzas de flujo opuestas que tienden a cerrar la válvula. También se utilizan tubos de chorro y boquillas de aletas como etapas piloto. El control preciso de la posición, tanto de la carga como del rotor principal, requiere ciclos de retroalimentación negativa que lleven información de la posición desde los potenciómetros en el rotor principal y en la varilla del cilindro. Estas señales se comparan con la señal de consigna  $V_i$  generada por la computadora.

#### 4.7 Sistemas eléctricos

En los robots se utilizan dos tipos principales de motores eléctricos: motores de pasos y servomotores de corriente directa. Los motores de pasos han encontrado gran variedad de aplicaciones en toda la maquinaria controlada por computadora ya que una computadora es el elemento ideal para generar las señales pulsadas de control requeridas. Los motores de pasos

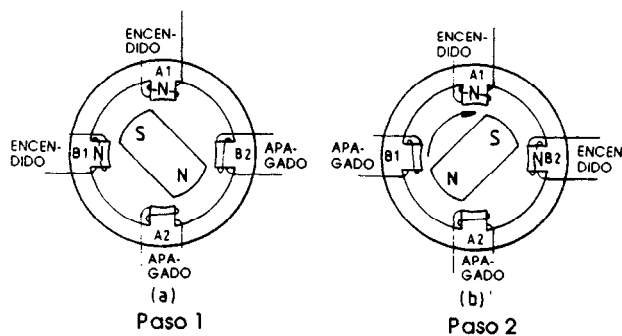
se desplazan a un ángulo fijo con cada pulso y como el tamaño del paso es fijo, puede obtenerse una posición determinada enviando el número adecuado de pulsos al motor.

Los sistemas de mayor tamaño requieren una mayor potencia y una mejor medición de la posición para facilitar el control de la retroalimentación y es aquí donde predomina el motor de corriente directa. Este es un dispositivo analógico y se mostrará que la fuerza generada es aproximadamente proporcional a la corriente aplicada.

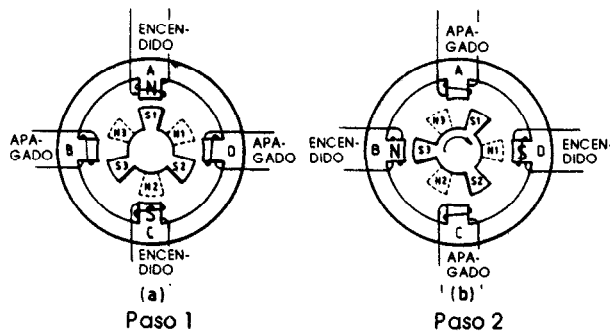
### Motores de pasos

Un robot requiere un control programable de su posición y muchos robots pequeños utilizan motores de pasos con este fin. El motor de pasos es en particular común entre los robots pequeños controlados por medio de una microcomputadora; esto se debe principalmente a que su uso elimina la necesidad de monitorear señales de retroalimentación. Cuando se pulsan de la manera correcta, los motores de pasos giran una cantidad conocida al mantener un conteo de los pulsos, es posible que la microcomputadora, que conoce las características geométricas del manipulador y los engranes del motor, calcule la posición del robot. Al conmutarse los embobinados del estator en secuencias definidas, este tipo de motor produce un movimiento angular fijo. Los tamaños normales de los pasos son  $7.5^\circ$ ,  $5^\circ$  y  $1.5^\circ$ .

El método de operación de un motor de pasos unipolar se ilustra en la figura 4.9. Existen dos juegos de embobinados para las fases: A y B; cada embobinado se convierte en polo norte (N) al energizarse. En la figura 4.9(a) atraen al polo sur (S) del imán permanente acoplado al rotor las bobinas  $A_1$  y  $B_1$ , que están encendidas o activadas. Al apagarse  $B_1$  y



**Figura 4.9** Motor de pasos unipolar: (a) las bobinas  $A_1$  y  $B_1$  están ENCENDIDAS,  $A_2$  y  $B_2$  están APAGADAS; (b) las bobinas  $A_1$  y  $B_2$  están ENCENDIDAS,  $A_2$  y  $B_1$  están APAGADAS.



**Figura 4.10** Motor de pasos bipolar de cuatro fases: (a) la bobina A está ENCENDIDA y atrae a  $S1$ ; la bobina C está ENCENDIDA y atrae a  $N2$ ; (b) la bobina B está ENCENDIDA y atrae a  $S3$ ; la bobina D está ENCENDIDA y atrae a  $N1$ .

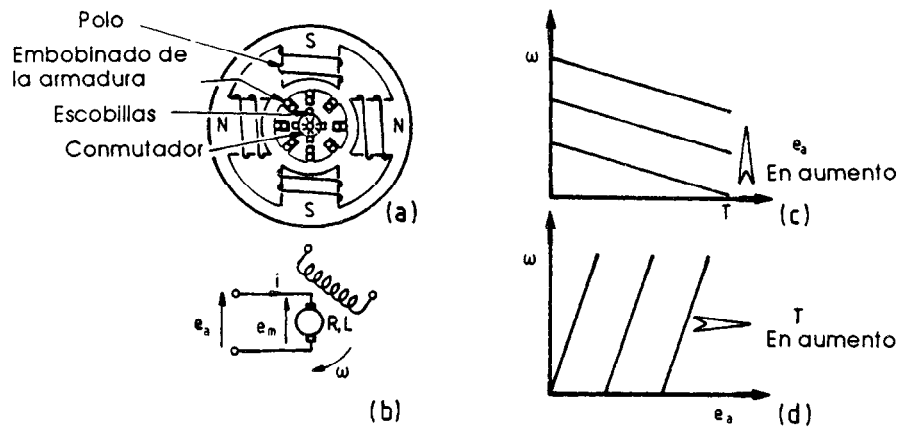
encenderse  $B_2$  el polo sur es atraído a una nueva posición a  $90^\circ$  en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj, como se muestra en la figura 4.9(b). La continuación de esta secuencia de encendido y apagado hace que el rotor avance  $90^\circ$  en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj cada vez que se activa la conmutación y la inversión de la secuencia produce un movimiento en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj.

El motor de pasos bipolar de cuatro fases que se muestra en la figura 4.10 tiene un paso de  $30^\circ$ . El rotor cuenta con tres polos N y con tres polos S y los embobinados se energizan como polos N o S en la secuencia mostrada.

Para lograr pasos todavía más pequeños es necesario incrementar el número de polos. Una característica inherente de los motores de pasos es su habilidad para mantener un par giratorio estático al ser energizados.

Los motores de pasos de reluctancia variable pueden aumentar en gran medida el número de posiciones estables, es decir, reducir el tamaño del paso. Esto puede lograrse colocando juntos varios motores secuenciales, alineando los estatores pero dejando un espacio constante entre los rotores. A través de este método al combinarse tres motores, por ejemplo con pasos de  $7.5^\circ$ , presentarán una posición estable cada  $1.5^\circ$ . Este efecto puede combinarse en un solo motor si se cuenta con un número distinto de polos en el estator y en el rotor. Existe una relación complicada entre la conmutación de los polos del estator y las posiciones estables, pero puede lograrse bajo el control de una computadora. Un ejemplo citado por Lhote y colaboradores (1984) es de un motor con ocho bobinas en el estator y 50 polos en el rotor; con distintas combinaciones de energización de las bobinas se pueden lograr 200 posiciones estables.





**Figura 4.11** Motor de corriente directa: (a) estator de cuatro polos con bobinas de campo radial y armadura axial; (b) representación eléctrica; (c) curvas de potencial constante de velocidad contra par; (d) curvas de par constante de velocidad contra potencial.

### Motores de corriente directa

El funcionamiento del motor de corriente directa se basa en el hecho de que un conductor que se encuentra colocado en un ángulo recto con respecto a un campo magnético experimenta una fuerza perpendicular a la corriente y a las líneas de fuerza magnéticas. El campo magnético radial se crea por medio de imanes permanentes o bobinas para generación de campos en el estator (figura 4.11(a)). El rotor transporta las bobinas de la armadura, colocadas en sentido axial, de manera que la fuerza creada cuando la corriente fluye a través de la armadura hace que el rotor gire. El estator puede tener cualquier número de polos mayor a dos; en el diagrama se muestran cuatro. Conforme cada bobina de la armadura pasa por polos con distinta polaridad, es necesario cambiar la dirección de la corriente de manera que el par inducido en el rotor tenga siempre la misma dirección. Esto se logra pasando la corriente de las escobillas a las bobinas a través de conexiones de conmutación. Las escobillas de carbono que hacen contacto sobre los segmentos de cobre del conmutador aseguran que se tenga una fricción reducida y una adecuada conexión eléctrica.

Un motor de corriente directa puede controlarse, es decir, puede variarse su velocidad o su par, al alterar la corriente del campo o de la armadura. Es mucho más común hacer variar la corriente de la armadura, con la corriente del campo fija, manteniendo así un campo magnético constante en el motor.

Puede construirse un modelo matemático de un motor de corriente directa como el descrito. Como el campo es constante, el par  $T$  ejercido

por el motor es proporcional a la corriente en la armadura  $i$ , es decir,  $T = C_t i$ .

La rotación de la armadura crea por sí misma un campo que se opone al paso de corriente a las bobinas y este campo contra-electromotriz  $e_m$  es proporcional a la velocidad  $\omega$  del motor, esto es,  $e_m = C_b \omega$ . El potencial real aplicado a la armadura es por lo tanto  $e_a - e_m$ , en donde  $e_a$  es el potencial aplicado a las escobillas. Este potencial neto produce una corriente  $i$  a través de la armadura contra la resistencia  $R$  y la inductancia  $L$  de las bobinas. De esta forma, el modelo para un motor de corriente directa controlado por medio de la armadura es

$$T = C_t i \quad Ri + L \frac{di}{dt} = e_a - e_m \quad e_m = C_b \omega \quad (4.9)$$

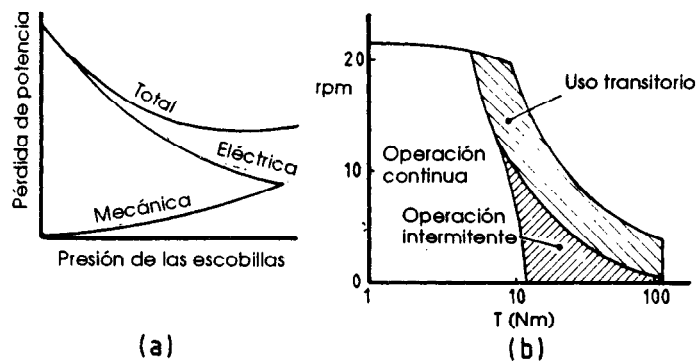
Estas ecuaciones, junto con consideraciones dinámicas de las cargas de inercia y de fricción (de los cojinetes y las escobillas), se han de utilizar en el capítulo 5 para formular leyes para el control de la posición del motor mediante una variación del potencial  $e_a$ .

En las figuras 4.11(c) y (d) se muestran las características de estado estable de un motor de corriente directa. Se requiere un incremento en  $e_a$ , para mantener una velocidad dada con una mayor carga o para incrementar la velocidad con una carga constante. Estos motores son dispositivos, de relativamente alta velocidad y bajo par y requieren, por lo general, un reductor para su aplicación en los robots. Como se indicó antes, un motor eléctrico es más pesado que un activador hidráulico para una potencia dada y la inclusión de engranes acentúa esta situación. La solución en el caso de los robots es con frecuencia montar el motor y los engranes en la base o cerca de ésta y transmitir la baja velocidad con alto par requerido por una articulación del manipulador mediante una transmisión mecánica; algunos de estos sistemas se analizarán más adelante.

Como el objetivo de un motor de corriente directa es convertir energía eléctrica en energía mecánica, su eficiencia se define como el porcentaje de potencia eléctrica convertido en potencia mecánica. Una eficiencia inferior al 100% indica que existen pérdidas y en los motores de corriente directa estas pérdidas pueden clasificarse como sensibles a la carga y a la velocidad (ECC, 1972). Todas las pérdidas se disipan como calor en última instancia, lo cual requiere que se introduzca aire de enfriamiento por medio de un ventilador conectado directamente al eje del rotor.

Las pérdidas sensibles a la carga las causa el flujo de la corriente a través de la resistencia de corriente directa del motor. Las pérdidas son sensibles a la carga dado que la corriente misma depende de la carga.

Las pérdidas debidas a la velocidad pueden tener diversas causas, por ejemplo:

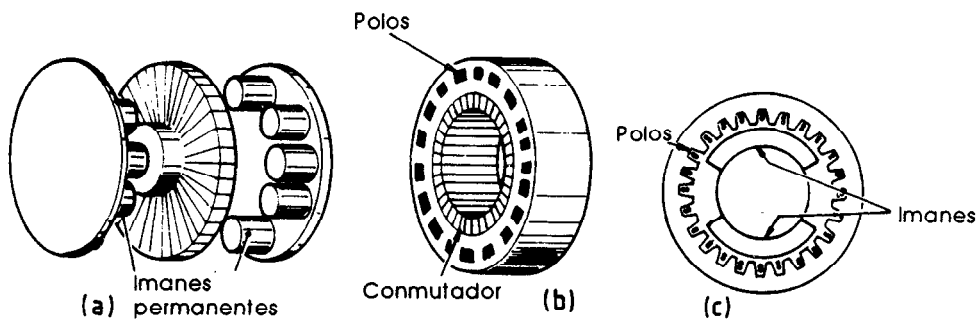


**Figura 4.12** Pérdidas en un motor: (a) relación entre pérdidas por fricción y eléctricas y presión de las escobillas; (b) limitantes de funcionamiento sobre el par y la velocidad.

- La resistencia de la conexión deslizante entre la escobilla y el conmutador, sobre la cual se ha acumulado una película de carbón, necesaria para la lubricación.
- Corrientes parásitas e histéresis en el núcleo de la armadura, derivadas del campo magnético cambiante.
- Fricción en los cojinetes y las escobillas; la selección del material, el tamaño y la presión de las escobillas es importante en un motor. Conforme se aumenta la presión la fricción se incrementa y la resistencia eléctrica disminuye y una presión óptima existe cuando la pérdida total es mínima (figura 4.12(a)).
- Cortocircuitos que ocurren cuando una escobilla actúa momentáneamente como puente entre dos segmentos del conmutador y cualquier diferencia de potencial hace que la corriente fluya, disipando energía pero sin realizar un trabajo útil.

El conocer las pérdidas permite predecir los pares y velocidades de rotación que pueden exigirse a un motor sin que ocurra un sobrecalentamiento. Como el efecto de calentamiento no es instantáneo, pueden imponerse exigencias intermitentes que no serían aceptables en una operación continua. En la figura 4.12(b) se muestra un ejemplo común de las limitaciones en la operación de un modelo (Morganite, 1961).

Existe un consumo de corriente cuando un motor está trabajando contra una carga, pero durante la desaceleración o cuando el motor gira debido a la inercia de la carga, podría recuperarse corriente del motor, ya que éste funciona efectivamente como un generador. Esta regeneración no está garantizada en la mayoría de los robots, pero puede justificarse en máquinas móviles que dependen de una batería con capacidad limitada.



**Figura 4.13** Motor de corriente directa: (a) tipo disco; (b) tipo plano; (c) tipo sin escobillas.

### ***Motores de disco y motores planos***

El motor común de corriente directa se usa extensamente en los robots, pero en la actualidad otras configuraciones están encontrando un número cada vez mayor de aplicaciones en la robótica.

En la figura 4.13(a) se ilustra el principio de funcionamiento del motor de disco, en el cual la armadura transporta la corriente a través de conductores radiales. El campo magnético es axial, creado por los imanes permanentes colocados a ambos lados del disco, de manera que la fuerza impartida al disco hace que éste gire. La reducida inercia de la armadura hace que el uso de motores de disco resulte atractivo en aplicaciones en donde se requieren aceleraciones elevadas.

El motor plano, denominado así debido a su alta relación diámetro/longitud, está caracterizado por un elevado par a baja velocidad, lo que hace que resulte adecuado para los actuadores directos (Margrain, 1983). El gran número de polos del motor crea un campo magnético radial y el conmutador tiene un gran diámetro con escobillas que hacen contacto sobre la cara plana (figura 4.13(b)). Este diseño permite reducir el peso del motor y simplificar su construcción, dado que el motor y el cojinete se diseñan como una misma unidad.

### ***Motores de corriente directa sin escobillas***

En lugar de hacer que las bobinas del conmutador giren, es posible colocar las bobinas en el estator y permitir que los polos de los imanes permanentes giren. No es necesaria una conexión eléctrica al rotor, por lo que se obtiene un motor de corriente directa sin escobillas (figura 4.13(c)). El campo debe girar para hacer que el rotor se mueva y esto se lleva a cabo mediante la conmutación electrónica de los polos creados por las bobinas del estator. Un gran número de polos puede brindar una estrecha resolución de la posición; una máquina utiliza un motor con 480 polos bajo el control de

una computadora (Braggins, 1984). En la actualidad el número de motores de corriente directa sin escobillas que encuentran aplicación en los robots es reducido, pero las investigaciones en este campo son muy activas (véase por ejemplo Horner y Lacey, 1983) y cabe esperar que jueguen un papel más importante en el futuro.

### ***Motores para impulso directo***

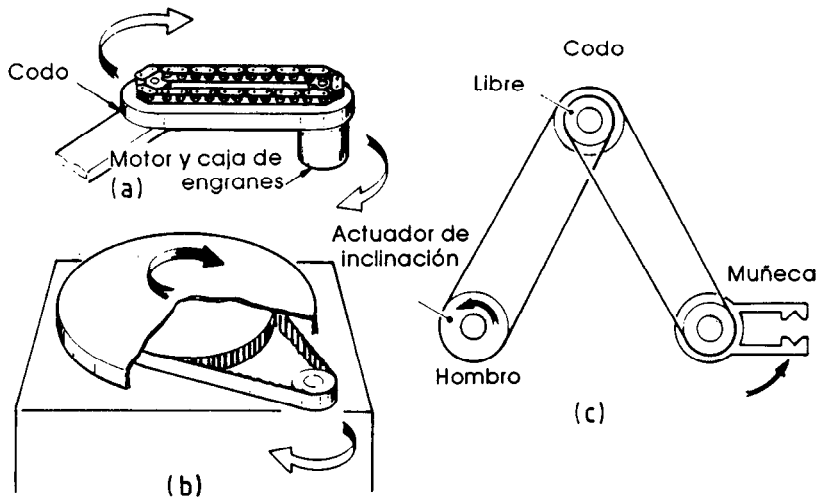
Los motores adecuados para un impulso directo están caracterizados por un elevado par y una baja velocidad. Se ha desarrollado ya un brazo con impulso directo (Asada y colaboradores, 1983) utilizando motores de corriente directa que funcionan de acuerdo con principios conocidos. Pueden lograrse elevados pares utilizando motores de gran diámetro; el mayor de estos motores tiene un diámetro de 560 mm y produce una fuerza de rotación de 204 Nm. El peso del motor se reduce mediante el uso de imanes a base de una aleación de samario y cobalto; esta aleación permite obtener hasta 10 veces la energía magnética que se puede obtener de los imanes comunes de aluminio-níquel o hierro. De esta forma es posible satisfacer todos los requisitos para un actuador directo: peso reducido, elevado par e inercia reducida para una rápida aceleración.

## **4.8 Transmisión mecánica**

En la sección 4.1 se vio que en un actuador directo no se tiene una transmisión mecánica entre el motor o actuador y el eslabón del robot que es impulsado. El actuador indirecto requiere enlaces mecánicos para la transmisión de la fuerza motriz. Con frecuencia involucra una fuente remota de poder y puede requerir una transmisión mecánica a través de una distancia considerable. Sin embargo, el término "indirecto" no significa que el actuador no se pueda colocar en la articulación. Existen unidades completas para robots que incluyen un motor, un reductor y dispositivos para la medición de la posición y la velocidad; la instalación de estas unidades en las articulaciones se ha denominado sistema de impulso casi directo (QDD) (Hartley, 1984).

### ***Impulsores remotos***

La construcción de la mayoría de los manipuladores requiere que el actuador del hombro mueva la carga en la tenaza, así como los brazos y cojinetes de la máquina, además de los actuadores del codo y la muñeca. Si los actuadores se pueden colocar cerca de la base existe una doble ganancia: la carga del hombro se reduce y disminuye la deflexión de los brazos. Se ilustró antes un ejemplo de esta técnica (figura 3.2(c)) en donde las tres rotaciones de la muñeca se lograban por medio de impulsores concéntricos en el brazo, con los motores colocados en el codo, reduciendo

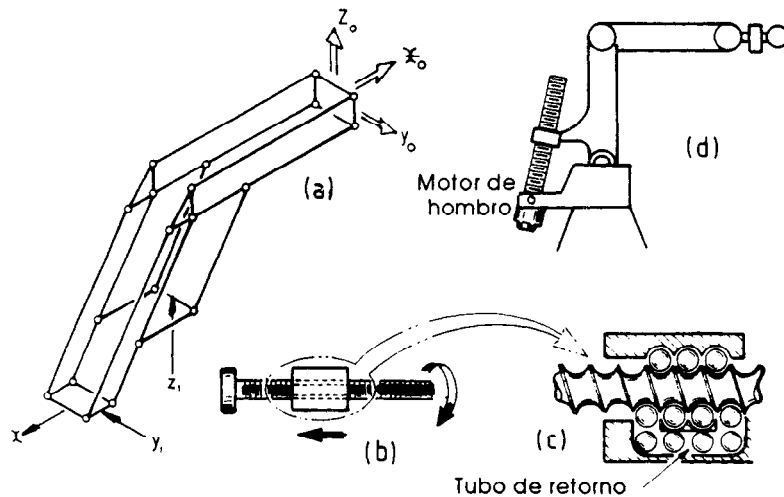


**Figura 4.14** Impulsor remoto: (a) codo SCARA impulsado por medio de una cadena; (b) impulsor de banda con base giratoria; (c) inclinación vertical impulsada por medio de cables.

así la carga sobre los actuadores del codo y el hombro. Es importante mencionar aquí otros tres dispositivos que pueden utilizarse para impulsar articulaciones en forma remota: cables, bandas y cadenas; mecanismos de enlace; y tornillos de bolas.

Las transmisiones por cadena se encuentran por lo general en los grandes manipuladores SCARA en los que el accionador del codo está montado en la base (figura 4.14(a)). Las máquinas más pequeñas pueden usar transmisiones de banda (figura 4.14(b)) o de cable (figura 4.14(c)). Incluso con un mecanismo tensionante, todos estos dispositivos están sujetos a juegos mecánicos debido al estiramiento del medio conductor del impulso. Las cadenas y bandas dentadas son impulsores positivos, mientras que un cable puede barrerse después de funcionar durante un tiempo prolongado.

Los impulsores de cable que se muestran en la figura 4.14(c) inclinan el codo bajo el control de un motor montado en la base. La polea del codo está libre para girar de manera que el ángulo del codo no afecta el ángulo de inclinación de la muñeca. Para mover el efector final de un robot en una trayectoria útil, por ejemplo, una línea recta horizontal, se necesitan complicados movimientos coordinados de los diversos actuadores. El impulsor de la muñeca de la figura 4.14(c) es una forma de reducir estas interacciones, de manera que al impulsar un actuador, sólo se afecte una coordenada real. El Locoman (Pham, 1983) desarrollado en la Universidad de Birmingham y comercializado por *Pendar Robotics* es un ejemplo notable de transmi-



**Figura 4.15** Transmisión mecánica: (a) configuración de manipulador de movimiento en paralelo; (b) movimiento lineal a partir de un tornillo de bolas; (c) construcción del tornillo de bolas; (d) hombro giratorio impulsado por medio de un tornillo de bolas.

siones diseñadas para eliminar la interacción en una configuración de brazo articulado. Los tres motores de la base impulsan al efector final en los tres ejes de coordenadas reales en forma independiente. El manipulador utiliza una combinación de pantógrafos y paralelogramos (figura 4.15(a)), de manera que los movimientos lineales en coordenadas reales en la base se reflejen como movimientos sobre los mismos ejes en el efector final. De esta forma se obtienen movimientos de la herramienta sobre una trayectoria controlada sin necesidad de realizar cálculos de transformación.

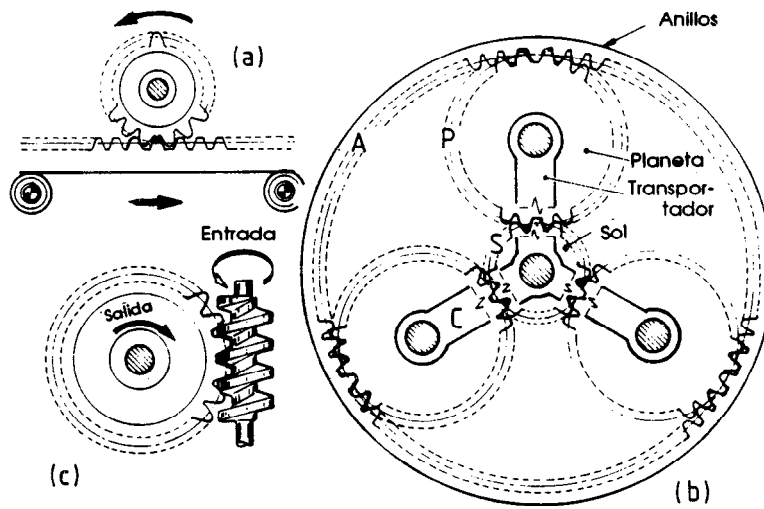
En este robot se emplean motores de pasos y el movimiento giratorio de los mismos se transforma en un movimiento lineal por medio de tornillos de bolas. Un tornillo de bolas consiste de un cojinete con una cuerda interior colocado sobre una varilla encordada. Si la varilla se gira y al mismo tiempo se impide la rotación del cojinete, el tornillo se desplazará en forma lineal; inversamente, si se deja fija la varilla, se puede obtener un movimiento lineal al hacer girar el cojinete (figura 4.15(b)). El cojinete no es simplemente una cuerda interna, sino un cojinete de bolas con forma de tornillo (figura 4.15(c)). Conforme el tornillo gira, las bolas se mueven alrededor de la cuerda del tornillo hasta que llegan al extremo del dispositivo, en donde ingresan a un tubo que las hace regresar al otro extremo. El nombre completo de este dispositivo es *tornillo de bolas recirculantes*. El tornillo sinfín es adecuado para configuraciones en donde se requiere un movimiento lineal, por ejemplo, configuraciones cilíndricas

o cartesianas. La configuración triangular de la figura 4.15(d) también se utiliza en forma extensa para producir un movimiento de rotación en manipuladores de brazo articulado.

### Engranes

Los engranes pueden usarse en los robots para alterar tanto la velocidad como la dirección de un movimiento de rotación y para cambiar un movimiento de rotación en un movimiento lineal o viceversa.

Un ejemplo de la conversión de un movimiento lineal a uno de rotación se presentó en la figura 4.3(f), en donde se empleó un sistema de cremallera y piñón para generar un movimiento de rotación a partir del



**Figura 4.16** Transmisión por engranes: (a) piñón y cremallera; (b) tren de engranes epicíclico; (c) impulsor de tornillo sinfín.

movimiento lineal de una varillá de pistón. El sistema de cremallera y piñón también puede encontrarse en robots en donde se desea obtener un movimiento lineal a partir de un motor (figura 4.16(a)).

En el capítulo 6 se verá que con frecuencia las velocidades del eje motriz se aumentan por medio de engranes con el fin de obtener una resolución adecuada en un sistema para medir la posición. Pero, para el accionamiento de robots, lo que se requiere invariablemente es un reductor, dado que la mayoría de los motores son de alta velocidad y de par reducido. Los engranes rectos son satisfactorios para reducciones modestas de velocidad; la reducción en la velocidad es igual a la relación entre los dientes de la rueda pequeña y los de la rueda de mayor tamaño.



El tren de engranes epicíclico (figura 4.16(b)) es más versátil y ofrece la ventaja de contar con ejes de entrada y salida en línea. Existen cuatro elementos en una transmisión epicíclica; rueda solar (con  $S$  dientes), ruedas planetarias (cada una con  $P$  dientes), sostenidas por un transportador (denotado por  $C$ ) y un anillo central, el cual tiene  $A$  dientes internos. La configuración geométrica del tren de engranes determina que  $A = S + 2P$  y  $P < 0.464A$ . El uso normal de un tren de engranes epicíclico consiste en fijar un elemento, tomar un segundo elemento como entrada y un tercero como salida. En teoría, por lo tanto, existen 24 formas de transmitir una rotación a través del tren, pero no todas estas formas son prácticas. La relación entrada/salida para cualquier combinación puede determinarse de la siguiente manera:

- 1) Girar el tren completo una vuelta en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj.
- 2) Sostener la salida propuesta y hacer girar el miembro que se propone mantener fijo una vuelta en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj.
- 3) Sumar las rotaciones resultantes.

Por ejemplo, el método usual para reducir la velocidad consiste en fijar el anillo central, girar la rueda solar y obtener la salida de una varilla acoplada al transportador. Si  $S = 20$ ;  $P = 60$ ;  $A = 140$ :

	$S$	$P$	$C$	$A$
Una revolución a la derecha	+1	+1	+1	+1
Sostener transportador, girando anillo central una revolución a la izquierda	+7	$-2\frac{1}{3}$	0	-1
Suma	+8	$-1\frac{1}{3}$	+1	0

La reducción resultante es 8:1.

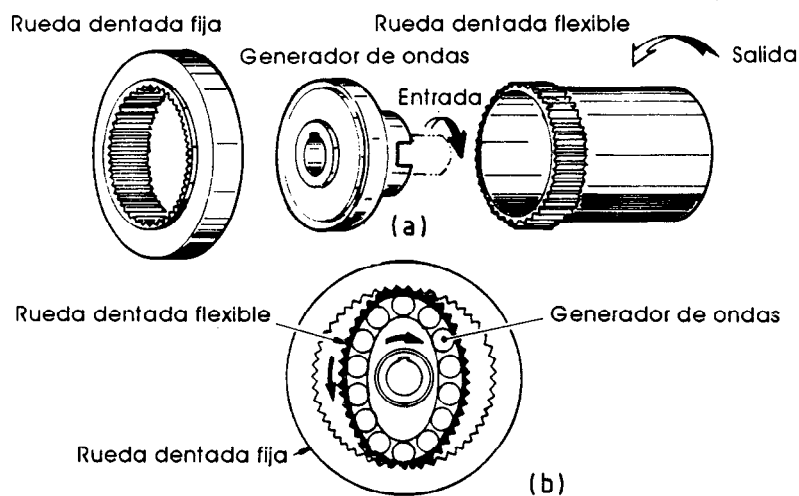
Pueden obtenerse reducciones más grandes mediante la integración de múltiples trenes epicíclicos en una sola caja de engranes, pero esta configuración no es deseable en el caso de los robots dado que existe un mayor juego que puede provocar errores de posicionamiento así como falta de estabilidad en los sistemas de control. También pueden obtenerse importantes reducciones a partir de tornillos sinfín (figura 4.16(c)), los cuales brindan una reducción de  $N:1$  utilizando un solo sinfín inicial y un engrane de  $N$  dientes. El tornillo sinfín se emplea en ocasiones para hacer girar la base de robots pequeños en donde la configuración es mecánicamente adecuada y tiene la ventaja de ser autoasegurable, es decir, la salida se asegura cuando la entrada se libera del par aplicado. Un impulsor de tornillo sinfín muestra un juego que aumenta en el caso de existir un juego axial en los cojinetes de entrada.

Los robots con frecuencia requieren grandes cajas de reducción sin juego; esto no puede obtenerse en una estructura ligera a través de sistemas de engranes convencionales y para satisfacer esta necesidad muchos manipuladores recurren al impulsor armónico.

### ***El impulsor armónico***

El sistema de transmisión de impulsor armónico (Kafrissen y Stephans, 1984) es también un reductor, pero su importancia dentro de la robótica requiere un análisis independiente en este libro. El impulsor armónico es un dispositivo patentado fabricado por la *Harmonic Drive Division of Emhart Machinery Group* (División de Impulsor Armónico del Grupo de Maquinaria Emhart) en Wakefield, Estados Unidos de Norteamérica. Se utiliza cuando se colocan motores eléctricos en las articulaciones del robot. Proporciona una gran relación de reducción; es mecánicamente rígido, ligero y carece de juego.

La construcción de un impulsor armónico adopta dos formas, una de las cuales se muestra en la figura 4.17(a). El eje de entrada impulsa un "generador de ondas" elíptico, que consiste simplemente en un cojinete de bolas ensamblado alrededor de un formador elíptico. El *Flexspline*, o elemento de salida, es una copa con un engrane externo. La pared de la copa es flexible; en estado libre es circular, pero su flexibilidad le permite amoldarse a la circunferencia del generador de ondas. Los dientes externos del Flexspline se acoplan a los dientes del engrane interno, el cual es rígido y está fijado sobre el cuerpo de la transmisión.



**Figura 4.17** Impulso armónico: (a) vista en explosión; (b) arreglo de los engranes.

Los dientes de ambos engranes tienen el mismo paso, pero el Flexspline tiene una menor cantidad de dientes que el engrane interno. En la figura 4.17(b) se muestra que el eje principal de la elipse formada por los dientes del Flexspline es igual al diámetro de paso del engrane interno. Este efecto ha sido exagerado en el diagrama con el fin de mostrar cómo los dientes se acoplan en dos áreas diametralmente opuestas; en la práctica, alrededor del 10 % de los dientes están siempre acoplados. Este porcentaje es mucho mayor que el de un engrane recto típico.

Si el engrane interno tiene  $N$  dientes y el Flexspline  $F$  dientes ( $F < N$ ), la relación de engranes es  $(-N/F) + 1$ . Este valor es siempre negativo, lo cual indica que la salida se mueve en sentido opuesto a la entrada.  $N - F$  debe ser un número par dado que los engranes deben acoplarse a intervalos de  $180^\circ$ . Es normal que  $N = 202$  y  $F = 200$ , lo que produce una relación de engranaje de  $-1/100$ .

El impulsor armónico es particularmente adecuado para relaciones de reducción de gran magnitud; puede obtenerse una reducción de 320:1. Dado que  $N - F$  es por lo general 2, la relación de reducción es por lo tanto la mitad del número de dientes con que cuenta el Flexspline.

Ahora es posible identificar la razón de la gran popularidad del impulsor armónico. El impulsor es muy ligero ya que el ensamble está integrado por pocos componentes y el tamaño de los engranes puede definirse sabiendo que una buena proporción de los dientes está acoplada en cualquier momento dado; este aspecto de su diseño también elimina el juego y contribuye a una mayor rigidez torsional.

Otra forma de impulsor armónico, el engrane plano, aun cuando presenta un cierto juego, resulta de gran utilidad cuando el espacio es de vital importancia. En este dispositivo, el *Flexspline* es simplemente una lengüeta de engranes flexibles sin copa para darle cuerpo. La entrada hace girar un generador de ondas y existe asimismo un engrane rígido fijo, como antes, pero la salida se toma de otro engrane cuyos dientes internos están acoplados al Flexspline. Este ensamble es más corto en sentido axial ya que no es necesaria una copa para transmitir la rotación generada.

#### 4.9 Resumen

Los actuadores para robots son dispositivos que sirven para convertir una fuerza eléctrica, hidráulica o neumática en una fuerza mecánica. Se han descrito las ventajas de estas tres fuentes de poder y los principios de funcionamiento de los actuadores. Se ha establecido una distinción entre el impulso directo y el impulso indirecto; los accionadores hidráulicos son adecuados para un impulso directo, mientras que los motores eléctricos con frecuencia requieren un sistema de engranes para incrementar el par generado. Se utilizan diversos tipos de impulsores remotos para eliminar el peso de un accionador de las articulaciones.



# Capítulo 5

## *Modelado y control*

---

### 5.1 Introducción

La función de un robot es llevar a cabo tareas útiles y esto no puede lograrse sin un medio para controlar los movimientos del manipulador. En el capítulo 1 se mencionó que en las aplicaciones más simples la posición de un efector final puede controlarse colocando topes mecánicos en el actuador. Estos dispositivos de levantamiento y colocación se han de analizar en mayor detalle en este capítulo.

La relativa falta de flexibilidad de los dispositivos para levantamiento y colocación impide que éstos se utilicen en aplicaciones más complicadas. Para éstas es esencial utilizar un control de malla cerrada, en el cual el error entre una variable deseada y una real se utilice con fines correctivos. En muchos de estos sistemas, el control de la posición del efector final es la principal preocupación pero, cada vez con mayor frecuencia, las aplicaciones requieren el control de la velocidad y la aceleración así como de la posición a lo largo de una trayectoria deseada. El movimiento prescrito se mantiene mediante la aplicación de pares o fuerzas correctivas en los actuadores para ajustar cualesquiera desviaciones del brazo respecto a la trayectoria establecida. Esto requiere contar con un servomecanismo en cada eje del robot para controlar las coordenadas de la máquina y sus derivadas.

Para el control del brazo de un robot es necesaria una tarea analítica extremadamente difícil. La dinámica de un robot con  $n$  grados de libertad es no lineal en su mayor parte: se describe por un conjunto de  $n$  ecuaciones diferenciales no lineales de segundo orden estrechamente acopladas (Bejczy, 1974). La no linealidad se deriva de la carga de inercia, del acoplamiento entre enlaces adyacentes del manipulador y de las cargas de

gravidad, todos los cuales varían de acuerdo con las coordenadas de la máquina. Estas dificultades se evalúan más adelante en el capítulo.

En cualquier sistema de control es importante conocer con precisión el valor deseado de la variable controlada. Cuando los robots se enseñan por medio de botoneras o a base de “llevarlos de la mano”, los valores deseados de cada coordenada de la máquina se registran durante la enseñanza. En muchas aplicaciones, sin embargo, la enseñanza por imitación no resulta ni adecuada ni satisfactoria. Un número cada vez mayor de aplicaciones utiliza la programación fuera de línea, en la cual la trayectoria deseada se expresa en coordenadas reales. La computadora debe entonces llevar a cabo la transformación inversa de coordenadas reales a coordenadas máquina con el fin de determinar los valores deseados para las coordenadas de la máquina. Posteriormente se considerarán dos métodos de control de la trayectoria: geométrico y cinemático.

Como cada eje de un robot requiere un servomecanismo, resulta relevante incluir un breve análisis de los sistemas de control lineal en malla cerrada. También se hace una breve mención de los sistemas digitales. Estos sistemas resultan particularmente útiles para optimizar el rendimiento del sistema de control de un robot. Como las ecuaciones son no lineales, para lograr un rendimiento óptimo en el control es necesario que los parámetros del sistema de control se alteren a través del volumen de trabajo del robot. Las técnicas de control digital permiten que la estrategia de control se determine por medio de una computadora; es por ello que éstas han adquirido una gran importancia en el campo de la robótica.

Por último, se presenta el control en malla cerrada por desacoplamiento utilizando controladores de velocidad y controladores de aceleración.

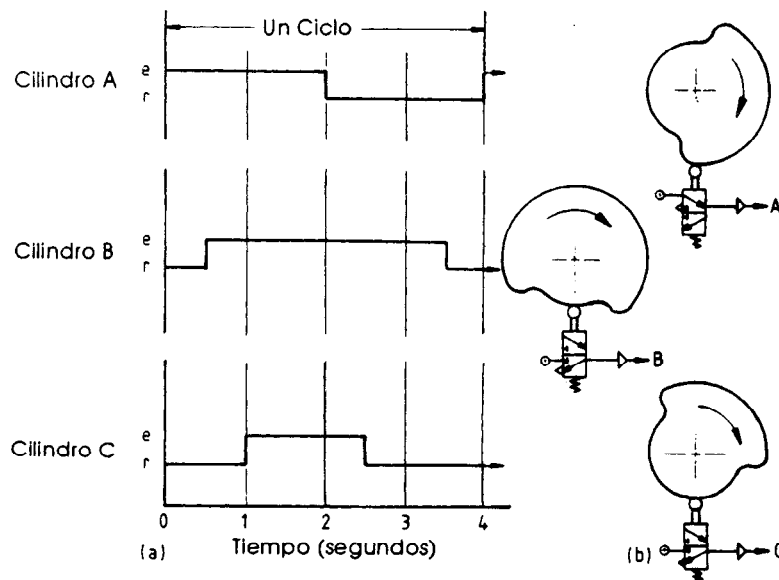
## 5.2 Control de la secuencia

Muchas de las máquinas automáticas llevan a cabo secuencias repetitivas de operaciones y para generar dichas secuencias pueden emplearse una gran variedad de dispositivos mecánicos, neumáticos, hidráulicos y electrónicos. Las secuencias pueden basarse en el tiempo, en cuyo caso las acciones se inician en momentos determinados de antemano, o basarse en la ocurrencia de un evento, en cuyo caso cada etapa se inicia una vez que termina la etapa anterior.

### *Control de secuencia basada en el tiempo*

El programador de árbol de levas se ha usado tradicionalmente para generar secuencias para una amplia gama de maquinaria mecánica, hidráulica y neumática.

El dispositivo consiste en una serie de levas montadas sobre un eje común que gira a una velocidad constante. Cada leva se opera en forma directa y activa un interruptor eléctrico o una válvula de paso.

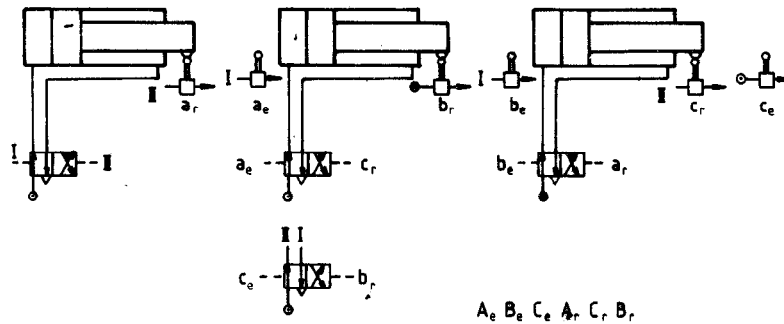


**Figura 5.1** Secuencia basada en el tiempo: (a) sincronización de las extensiones, *e* y las retracciones, *r*; (b) bielas y válvulas asociadas.

En la figura 5.1(a) se muestra una secuencia simple de extensiones (*e*) y retracciones (*r*) durante un ciclo de 4 segundos para una máquina con tres cilindros A, B y C y en la figura 5.1(b) se muestran las levas necesarias para instrumentar la secuencia, con el eje girando a 0.25 revoluciones/segundo.

### Control de la secuencia basado en la ocurrencia de eventos

El programador de levas genera una secuencia particular durante un periodo de tiempo dado, pero con frecuencia es necesario asegurar que cada etapa de la secuencia termine antes de comenzar la siguiente, es decir, contar con un control basado en la ocurrencia de eventos. Gran parte de la maquinaria neumática tiene este requisito y las secuencias basadas en la ocurrencia de eventos pueden generarse fácilmente por medio de válvulas operadas por un piloto. El sistema de cascada (McCloy y Martin, 1980) puede usarse para diseñar el circuito neumático; en la figura 5.2 se muestra el circuito en cascada para la secuencia *Ae Be Ce Ar Cr Br* (de nuevo *e* indica una extensión y *r* una retracción). La terminación de cada extensión y retracción en la secuencia opera una válvula límite y la señal piloto de esta válvula inicia entonces la siguiente etapa dentro de la secuencia, haciendo funcionar la válvula principal adecuada, ya sea en forma directa o indirecta, a través de una válvula selectora de grupos. La válvula selectora es necesaria para evitar que la señal se bloquee, condición que ocurre cuando una señal piloto



**Figura 5.2** Secuencia basada en eventos: circuito en cascada para  
Ae Be Ce Ar Cr Br.

no puede activar una válvula debido a la continua presencia de una señal piloto opuesta.

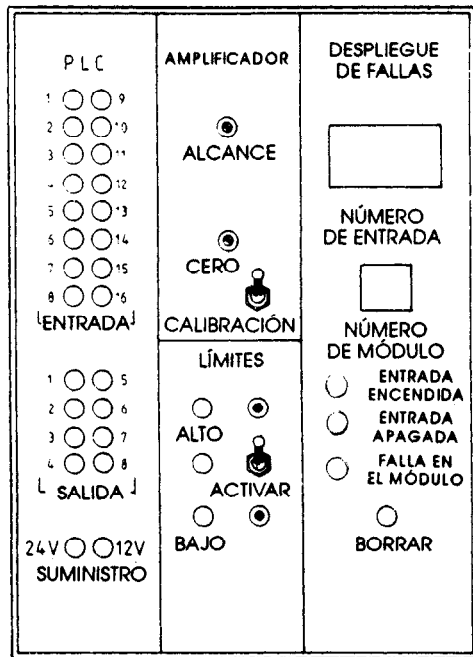
### Controlador lógico programable (PLC)

El controlador lógico programable (PLC) es capaz de suministrar tanto un control basado en el tiempo como un control basado en eventos (C & I, 1986). Considérese un dispositivo neumático para levantamiento y colocación con dos grados de libertad. La extensión del cilindro A provee la acción de sujeción, es decir, Ae = sujeción. De manera similar, Ar = liberación, Be = arriba, Br = abajo, Ce = hacia afuera y Cr = hacia adentro. Se requiere que el dispositivo levante un perno de una alimentadora automática, lo coloque en una mesa de selección, levante la tenaza evitando la mesa, indique a la mesa que debe proceder con la selección y regrese las tenazas para tomar el siguiente perno. La secuencia requerida, suponiendo que todos los cilindros están retraídos al iniciarse la secuencia, es

sujetar un perno	Ae
levantar	Be
hacia afuera	Ce
hacia abajo	Br
soltar el perno	Ar
levantar	Be
encender la señal de selección para 0.5 segundos	
hacia adentro	Cr
hacia abajo	Br

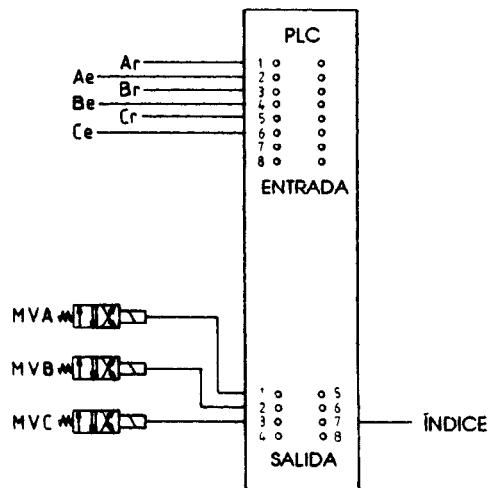
Como en esta secuencia hay funciones basadas tanto en el tiempo como en la ocurrencia de eventos, sería difícil instrumentar este circuito usando solamente bielas o circuitos en cascada. En el caso de un circuito en cascada, la señal de selección podría obtenerse de un relé y reloj eléctricos operados





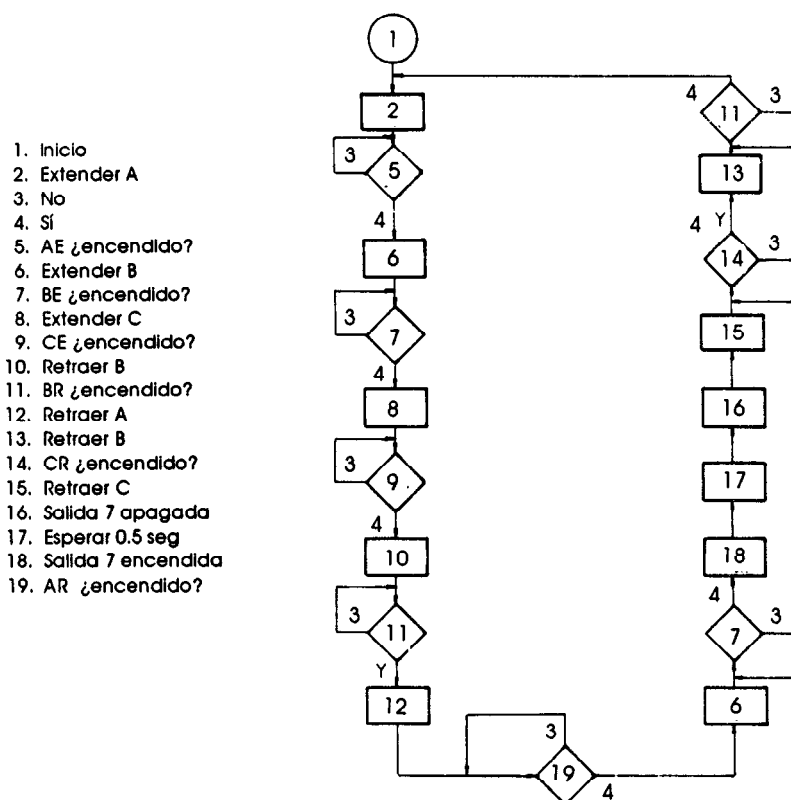
**Figura 5.3** Controlador lógico programable: placa delantera de un modelo común.

por aire. Pero esta aplicación en particular requiere que el cilindro *B* se extienda y retraiga dos veces en cada secuencia, un requisito para el que se necesita un número excesivo de componentes para un circuito en cascada.



**Figura 5.4** Controlador lógico programable: conexiones para una aplicación común.

El PLC domina en este tipo de aplicación. Un PLC básico es un dispositivo basado en un microprocesador que enciende y apaga un cierto número de salidas eléctricas, de acuerdo con una secuencia previamente programada; incluye también la sincronización y toma de decisiones basadas en la condición de un cierto número de entradas eléctricas. Los fabricantes ofrecen ya sea una variedad de modelos en paquete que pueden diferir sólo en el número de entradas y salidas suministradas, o confinar cada función a módulos individuales, para que el usuario construya un PLC que satisfaga las necesidades de su aplicación en particular. Las funciones básicas serán evidentes en una vista frontal de un PLC como el descrito (figura 5.3) (Wickman, sin fecha). De izquierda a derecha, el primer módulo contiene el controlador de secuencia, las luces del panel que muestran el estado de todas las entradas y salidas (en este caso 16 entradas y 8 salidas). El microprocesador en este módulo controla la secuencia, incluyendo todas las funciones de sincronización, de acuerdo con el programa almacenado en una memoria programable y modificable de lectura solamente (EPROM). La EPROM no pierde el programa al apagarse.



**Figura 5.5** Diagrama de flujo de una secuencia que involucra decisiones basadas en tiempos y basadas en eventos.

Este PLC en particular también contiene un amplificador que puede aceptar señales analógicas generadas por un transductor que mide, por ejemplo, la temperatura, la presión o los pares. También existe un módulo que compara la señal del amplificador con los límites preestablecidos y presenta una señal “alta”, “dentro de los límites” o “baja”. Esta señal se transmite al conductor colectivo común en la parte trasera de la unidad, el cual conecta todos los módulos, en donde podrá interrogarse durante la ejecución del programa. Si este proceso se interrumpe, el módulo de exhibición de fallas colocado a la derecha indica qué etapa de la secuencia se estaba ejecutando al momento de suceder la interrupción, así como el número y el estado de la entrada que se está monitoreando en ese momento.

En la figura 5.4 se muestra el equipo necesario para controlar cualquier secuencia de operaciones del dispositivo de levantamiento y colocación mencionado. Las válvulas neumáticas de límite *Ar*, *Ae*, *Br*, *Be*, *Cr* y *Ce* se han reemplazado con sencillos microinterruptores conectados a las entradas 1 a 6 del PLC. Los cilindros *A*, *B* y *C* se extienden y retraen por medio de la activación o desactivación de válvulas de resorte operadas por medio de solenoides en las salidas 1, 2 y 3. La señal de selección se obtiene de la salida 7. En la figura 5.5 se muestra el diagrama de flujo del programa PLC para la secuencia anterior. La primera operación es encender la salida conectada a *Ae*, lo cual origina el movimiento de sujeción. En este momento es interrogada la entrada conectada al microinterruptor que se crea cuando las tenazas se cierran: “¿*Ae* encendida?” Si la respuesta es no (N) el programa retrocede para repetir la interrogación hasta que se cierran las tenazas; una respuesta sí (Y) inicia la siguiente etapa *Be*. Una vez compilado el diagrama de flujo, el programa PLC puede escribirse fácilmente y, para esta secuencia en particular, el programa resultante es:

```
10 OUTPUT 1 ON
20 WAIT FOR INPUT 2 TO COME ON
30 OUTPUT 2 ON
40 WAIT FOR INPUT 4 TO COME ON
50 OUTPUT 3 ON
60 WAIT FOR INPUT 6 TO COME ON
70 OUTPUT 2 OFF
80 WAIT FOR INPUT 3 TO COME ON
90 OUTPUT 1 OFF
100 WAIT FOR INPUT 1 TO COME ON
110 OUTPUT 2 ON
120 WAIT FOR INPUT 4 TO COME ON
130 OUTPUT 7 ON
140 WAIT 0.5 s
150 OUTPUT 7 OFF
160 OUTPUT 3 OFF
170 WAIT FOR INPUT 5 TO COME ON
180 OUTPUT 2 OFF
190 WAIT FOR INPUT 3 TO COME ON
200 GO TO 10
```

Para alimentar el programa al PLC, primero será necesario capturarlo en una microcomputadora con el formato anterior. La microcomputadora traduce el programa al lenguaje del microprocesador en el PLC, lenguaje de máquina (véase capítulo 7), y lo transmite a la unidad de programación. La unidad tiene la capacidad para programar el PLC en forma directa, haciendo una copia en cinta o en disco de un programa y programando el módulo PLC desde la cinta o el disco.

### ***Topes finales***

La unidad de levantamiento y colocación antes descrita sería inflexible si no contara con alguna forma de control sobre las dos posiciones extremas que puede adoptar cada eje. Esto puede lograrse por medio del ajuste mecánico de los topes finales contra los que golpea un cilindro al final de su desplazamiento. Con frecuencia se añaden posiciones intermedias en los ejes de levantamiento y colocación mediante la instalación de topes de encendido-apagado.

## **5.3 Modelo dinámico de un robot**

Un manipulador cargado es un sistema dinámico y es posible, al conocer la trayectoria deseada del efector final, expresar las fuerzas o pares requeridos por los actuadores para lograr este movimiento en términos de las posiciones, velocidades y aceleraciones a lo largo de la trayectoria y los parámetros del manipulador. Las expresiones pueden obtenerse por medio del enfoque de energía, ejemplificado por Lagrange (Paul, 1982) o por el método de Newton, que relaciona las fuerzas y los pares con las masas, inercias y aceleraciones (Luh y colaboradores, 1979). Las ecuaciones incluidas en esta sección suponen que el manipulador está constituido por enlaces rígidos.

### ***Ecuación dinámica de un robot***

El problema de control dinámico consiste en determinar los patrones de pares (como funciones del tiempo) que deben aplicarse con los actuadores para lograr el movimiento deseado, dada la trayectoria deseada del efector final. Una vez que se cuenta con un modelo geométrico del manipulador, la computadora puede transformar la trayectoria requerida de coordenadas reales a coordenadas máquina; al contar con un modelo dinámico, que relaciona los pares con la posición, la velocidad y la aceleración de las coordenadas máquinas, la computadora puede predecir los patrones de pares requeridos. El modelo dinámico adopta la forma

$$T + [W(\Theta)] = [M(\Theta)] \ddot{\Theta} + [N(\Theta)] (\dot{\Theta})^2 + [P(\Theta)] \dot{\Theta}_i \dot{\Theta}_j \quad (5.1)$$

en donde  $\Theta$  es el vector de coordenadas de máquina y todas las matrices son en general no lineales.  $[W(\Theta)]$  determina los pares aplicados debidos a la gravedad y  $M$ ,  $N$  y  $P$  cuantifican los pares que surgen de las fuerzas de inercia, centrífuga y de Coriolis, respectivamente. Si la máquina tiene  $n$  grados de libertad,  $M$  y  $N$  tienen dimensiones  $n \times n$ . La matriz de Coriolis  $P$  tiene las dimensiones  $n \times C_n^2$  dado que estas fuerzas se derivan de combinaciones del producto  $\Theta_i \dot{\Theta}_j$ .

### Cálculo de los coeficientes dinámicos

El problema principal con la aplicación de un control dinámico en tiempo real es la complejidad de muchos de los términos en la ecuación (5.1). Para ilustrar lo anterior consideraremos el manipulador con tres grados de libertad que se muestra en la figura 5.6 suponiendo las siguientes simplificaciones: las masas de los brazos están concentradas en sus centros; una masa concentrada  $m_{23}$  representa el actuador del codo; además la muñeca, las tenazas y la carga están representadas por una masa concentrada  $m_{34}$ . Los eslabones 2 y 3 tienen respectivamente las longitudes  $L_2$  y  $L_3$ . Los pares requeridos están dados por la ecuación (5.1), que en este caso tiene la forma

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} = [M(\Theta)] \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + [N(\Theta)] \begin{bmatrix} (\dot{\theta}_1)^2 \\ (\dot{\theta}_2)^2 \\ (\dot{\theta}_3)^2 \end{bmatrix} + [P(\Theta)] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

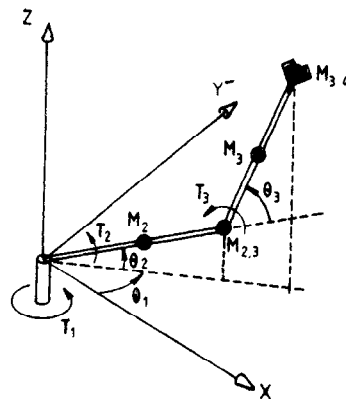


Figura 5.6 Un manipulador con tres grados de libertad.

El análisis se incluye en el apéndice I, pero los resultados se presentan en esta sección con el fin de ilustrar la complejidad, el acoplamiento y las no linealidades que intervienen. La presentación se simplifica si se identifican las siguientes masas e inercias efectivas:

$$\begin{aligned} M_a &= 0.5m_2 + m_{23} + m_3 + m_{34} & M_b &= m_3 + 2m_{34} \\ I_a &= (0.25m_2 + m_{23} + m_3 + m_{34})L_2^2 \\ I_b &= (m_3 + 2m_{34})L_2L_3 & I_c &= (m_3 + 4m_{34})L_3^2 \end{aligned}$$

La siguiente notación abreviada también es útil:

$$C(\alpha + \beta) = \cos(\alpha + \beta) \quad S(\alpha + \beta) = \sin(\alpha + \beta)$$

$$\begin{aligned} T_1 &= [I_a C^2 \theta_2 + I_b C \theta_2 C(\theta_2 + \theta_3) + 0.25 I_c C^2(\theta_2 + \theta_3)] \ddot{\theta}_1 \\ &\quad - [I_a S(2\theta_2) + I_b S(2\theta_2 + \theta_3) + 0.25 I_c S(2\theta_2 + 2\theta_3)] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ &\quad - [I_b C \theta_2 S(\theta_2 + \theta_3) + 0.25 I_c S(2\theta_2 + 2\theta_3)] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ T_2 &- [M_a L_2 C \theta_2 + 0.5 M_b L_3 C(\theta_2 + \theta_3)] g \\ &= [I_a + 0.25 I_c + I_b C \theta_3] \ddot{\theta}_2 + [0.25 I_c + 0.5 I_b C \theta_3] \ddot{\theta}_3 \\ &\quad + [0.5 I_a S(2\theta_2) + 0.125 I_c S(2\theta_2 + 2\theta_3) \\ &\quad + 0.5 I_b S(2\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_1^2 \\ &\quad - [0.5 I_b S \theta_3] \dot{\theta}_3^2 - [I_b S \theta_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ T_3 &- [0.5 M_b L_3 C(\theta_2 + \theta_3)] g \\ &= [0.25 I_c + 0.5 I_b C \theta_3] \ddot{\theta}_2 + [0.25 I_c] \ddot{\theta}_3 \\ &\quad + [\{0.5 I_b C \theta_2 + 0.25 I_c C(\theta_2 + \theta_3)\} S(\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_1^2 \\ &\quad + [0.5 I_b S \theta_3] \dot{\theta}_2^2 . \end{aligned} \tag{5.3}$$

Así, al conocer la trayectoria deseada y las velocidades y aceleraciones sobre dicha trayectoria, es posible calcular las coordenadas máquina y sus derivadas por medio de transformaciones inversas y determinar de esta forma los pares actuantes requeridos para lograr la trayectoria deseada. Sin embargo, esto puede consumir una gran cantidad de tiempo; se ha demostrado que si se emplea el método de Lagrange, se requieren aproximadamente 8 segundos de simulación en Fortran para calcular el movimiento entre dos puntos adyacentes en una trayectoria planeada para un robot con seis articulaciones (Luh y colaboradores, 1980a). Es evidente que lo anterior es demasiado lento para aplicaciones en línea. El tiempo de cómputo puede reducirse mediante la simplificación de las ecuaciones, por

ejemplo, ignorando los términos de segundo orden de Coriolis y la reacción centrífuga, pero estos modelos aproximados resultan en un rendimiento dinámico subóptimo y requieren que se restrinjan las velocidades de los brazos. Afortunadamente se ha ideado un método que es, al mismo tiempo, rápido y preciso. El método está basado en la formulación de Newton de las ecuaciones dinámicas y su velocidad se debe a que las ecuaciones son recursivas, es decir, la misma ecuación puede aplicarse en turno a cada uno de los eslabones. Se ha determinado (Lee, 1982) que con este método se requieren solamente 3 ms (en una computadora PDP11/45) para calcular los pares de las articulaciones para un punto dado de la trayectoria.

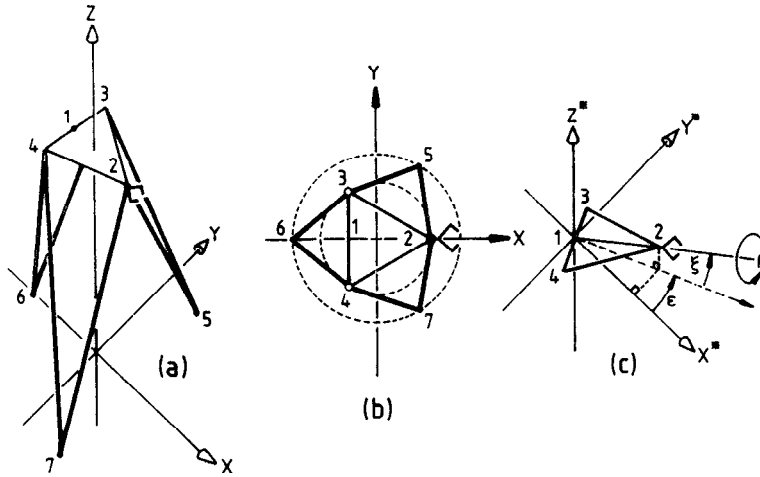
#### 5.4 Control geométrico y cinemático de la trayectoria

La aplicación de los métodos geométrico y cinemático para el control de la trayectoria supone que el manipulador pasa por una sucesión de estados de equilibrio. Como se ha visto antes, es probable que esto sea una suposición razonable sólo cuando se emplean actuadores fuertes y las velocidades son reducidas. El control geométrico determina los valores deseados de las coordenadas máquina mientras que el control cinemático determina los valores deseados para la razón de cambio de las coordenadas máquina.

##### *Control geométrico*

El control geométrico aquí descrito se usa por lo general para generar un movimiento sobre ciertas trayectorias deseadas a velocidades controladas. Esto se logra calculando una secuencia de coordenadas máquina en tiempo real, representativas de coordenadas reales intermedias sobre la trayectoria deseada. Cuando se han determinado las coordenadas máquina deseadas, los  $n$  servomecanismos (para  $n$  grados de libertad) llevarán el efector final a las coordenadas reales deseadas a lo largo de una trayectoria impredecible. Existirán errores en las coordenadas reales obtenidas debido al juego en los cojinetes, la elasticidad de los eslabones y las resoluciones de los sistemas para control de la posición.

La transformación inversa para un robot con seis grados de libertad puede ser una tarea formidable. Paul (1982) ilustra lo anterior para el Manipulador Stanford mientras que el PUMA de *Unimation* ha sido analizado por Lee y Ziegler (1983). En esta sección se considerará un robot con eslabones paralelos (similar al Gadfly de GEC), debido básicamente a que la tarea requiere menor tiempo y espacio para su análisis. La configuración se muestra en la figura 5.7. La posición de referencia inicial se muestra en la figura 5.7(a), con la placa triangular sosteniendo las tenazas dispuestas de manera simétrica a una altura  $h$  sobre y paralela al triángulo equilátero formado por los puntos de fijación a tierra. El plano de coordenadas reales XYZ tiene su origen en el piso al centro de dos círculos concéntricos que



**Figura 5.7** Un robot con topología paralela: (a) configuración general; (b) vista de planta de la posición de referencia; (c) coordenadas de rotación.

circunscriben la placa 234 y los puntos de fijación a tierra 567 (radios  $r$  y  $R$  respectivamente). La figura 5.7(b) es una vista de planta de la posición inicial de referencia en la cual las coordenadas  $xyz$  de las tenazas son  $(r, 0, h)$ . En la figura 5.7(c) se muestra la placa en una posición alterada. Los ángulos  $p$ ,  $\xi$  y  $\epsilon$  son los grados de libertad en orientación en coordenadas reales. Con respecto a un referencial  $X^*Y^*Z^*$ , paralelo al referencial  $XYZ$  y con origen en el punto 1 de la placa, puede demostrarse (apéndice II) que

$$\left. \begin{aligned} x_2^* &= m \cos \xi \cos \epsilon \\ y_2^* &= m \cos \xi \sin \epsilon \\ z_2^* &= m \sin \xi \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

en donde  $m$  es la distancia entre los puntos 1 y 2 de la placa,

$$\left. \begin{aligned} x_3^* &= -n[\cos p \sin \epsilon + \sin p \sin \xi \cos \epsilon] \\ y_3^* &= n[\cos p \cos \epsilon - \sin p \sin \xi \sin \epsilon] \\ z_3^* &= n \sin p \cos \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

en donde  $n$  es la mitad de la longitud del lado de la placa,

$$\left. \begin{aligned} x_4^* &= n[\cos p \sin \epsilon + \sin p \sin \xi \cos \epsilon] \\ y_4^* &= n \sin p \sin \xi \sin \epsilon - \cos p \cos \epsilon \\ z_4^* &= -n \sin p \cos \xi \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$



Al conocer las coordenadas de los puntos 2, 3 y 4 en el referencial  $X^*Y^*Z^*$  es posible resolver el problema inverso consistente en determinar las coordenadas de máquina a partir de las coordenadas reales. Si el vector de coordenadas reales de las tenazas es  $[x_2, y_2, z_2, \xi, \epsilon, p]^T$ , ¿cuáles serán las extensiones de los diversos eslabones a partir de sus posiciones de referencia? El procedimiento es el siguiente:

1) Encontrar  $x_1y_1z_1$  a partir de

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_2 - x_2^* \\ y_1 &= y_2 - y_2^* \\ z_1 &= z_2 - z_2^* \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

2) Encontrar  $x_3y_3z_3$  a partir de

$$\left. \begin{aligned} x_3 &= x_1 + x_3^* \\ y_3 &= y_1 + y_3^* \\ z_3 &= z_1 + z_3^* \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

3) Encontrar  $x_4y_4z_4$  a partir de

$$\left. \begin{aligned} x_4 &= x_1 + x_4^* \\ y_4 &= y_1 + y_4^* \\ z_4 &= z_1 + z_4^* \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

Una vez conocidas las coordenadas de los tres puntos de fijación de la placa en coordenadas reales, la determinación de las longitudes de los seis eslabones se realiza directamente al utilizar la ecuación:

$$L_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (5.10)$$

en donde  $j(2, 3, 4)$  define un punto final en la placa e  $i(5, 6, 7)$  un punto final correspondiente en tierra.

El cambio en una coordenada de máquina se determina a partir de

$$\Delta L_{ij} = L_{ij} - L \quad (5.11)$$

en donde  $L$ , la longitud de referencia, se obtiene de

$$L = \sqrt{R(R - r) + r^2 + h^2}$$

Un ejemplo ayudará a aclarar los procedimientos. Considérese  $R = 1.5$  m,  $r = 1$  m,  $h = 5$  m y supóngase una aplicación en la que es necesario

cambiar el vector de coordenadas reales del efector final de un valor inicial de  $[1, 0, 5, 0, 0, 0]^T$  a un valor final de  $[1, 1, 6, 30^\circ, 30^\circ, 30^\circ]^T$ . Además, al realizar este movimiento, el efector final debe seguir una ruta en línea recta a una velocidad de 0.0707 m/s. La longitud de la ruta se calcula como de 1.414 m, por lo que se requerirá un tiempo de 20 s para el movimiento. En la tabla 5.1 se muestran las coordenadas de máquina requeridas a intervalos de 2 s. En la práctica, el número de incrementos será mucho mayor que el que se muestra, lo que permite que se realicen modificaciones en los servomotores a intervalos de aproximadamente 0.2 s. Debe notarse también que se logra un control coordinado, es decir, todas las coordenadas máquina alcanzan sus valores finales de manera simultánea.

Tabla 5.1

$t$	$x_2$	$y_2$	$z_2$	$\xi^\circ$	$p^\circ$	$\epsilon^\circ$	$\Delta L_{27}$	$\Delta L_{25}$	$\Delta L_{35}$	$\Delta L_{36}$	$\Delta L_{46}$	$\Delta L_{47}$
0	1	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0.1	5.1	3	3	3	0.122	0.073	0.074	0.060	-0.017	-0.033
4	1	0.2	5.2	6	6	6	0.246	0.149	0.147	0.120	-0.030	-0.067
6	1	0.3	5.3	9	9	9	0.370	0.227	0.218	0.179	-0.040	-0.101
8	1	0.4	5.4	12	12	12	0.494	0.308	0.288	0.239	-0.044	-0.132
10	1	0.5	5.5	15	15	15	0.620	0.391	0.356	0.298	-0.044	-0.159
12	1	0.6	5.6	18	18	18	0.747	0.477	0.421	0.356	-0.037	-0.180
14	1	0.7	5.7	21	21	21	0.874	0.565	0.483	0.414	-0.022	-0.192
16	1	0.8	5.8	24	24	24	1.001	0.655	0.542	0.470	0.002	-0.195
18	1	0.9	5.9	27	27	27	1.123	0.747	0.597	0.526	0.035	-0.186
20	1	1	6	30	30	30	1.258	0.841	0.648	0.581	0.078	-0.160

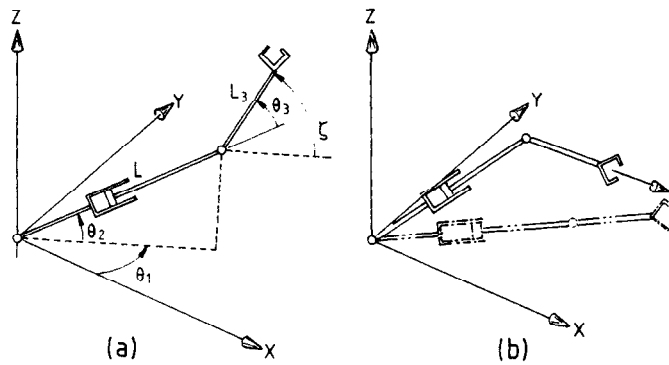
### Control cinemático

Se ha demostrado que el control geométrico, aunque exacto, necesita cálculos complejos que deben llevarse a cabo en muy poco tiempo. El control cinemático simplifica los cálculos mediante la utilización del método aproximado de pequeñas perturbaciones para controlar la velocidad a partir de una posición conocida. El método se presentó en el capítulo 2, en donde el Jacobiano  $J$  de la matriz  $T$  se definió como

$$J = \frac{\partial X}{\partial \Theta} = \frac{\partial T}{\partial \Theta} \quad (5.12)$$

El método cinemático utiliza la ecuación inversa

$$\Delta \Theta = J^{-1} \Delta X \quad (5.13)$$



**Figura 5.8** Un manipulador con cuatro grados de libertad: (a) los grados de libertad  $L$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$ ;  $\xi$  es el ángulo de inclinación vertical; (b) el manipulador al inicio y al final de su trayectoria.

para generar los valores incrementales de  $\Theta$  requeridos para los incrementos  $\Delta X$ . El jacobiano es en general una función no lineal de  $\Theta$ , por lo cual los valores de sus elementos cambian conforme el manipulador se mueve. Los controles de la computadora normalmente actualizan los valores de posición a intervalos de tiempo regulares y el siguiente procedimiento genera una secuencia de valores incrementales  $\Delta \Theta$  que definen las velocidades de las articulaciones de la máquina o que pueden usarse para actualizar los valores requeridos para las coordenadas máquina:

- Paso 1: calcular  $\Delta X$  para la velocidad requerida
- Paso 2: formular el jacobiano
- Paso 3: calcular  $J$  para el valor actual de  $\Theta$
- Paso 4: calcular  $J^{-1}$
- Paso 5: calcular  $\Delta \Theta$
- Paso 6: incrementar  $\Theta$  por  $\Delta \Theta$
- Paso 7: regresar al Paso 3

Considérese la configuración polar que se muestra en la figura 5.8(a) que cuenta con un actuador de inclinación vertical en la muñeca. Existen cuatro grados de libertad:  $L$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$ . El punto de centros de la herramienta debe moverse de las coordenadas iniciales

$$X_s = (x, y, z, \xi)^T = (1, 0, 1, 0)^T$$

a las coordenadas finales

$$X_D = (1, 1, 0, 0)^T \text{ (Figura 5.8(b))}$$

en 10 s y la computadora actualiza los valores cada 100 ms. ¿Qué coordenadas máquina se requieren en cada intervalo de tiempo para lograr un movimiento en línea recta a una velocidad constante?

Al usar la notación abreviada presentada en el capítulo 2, la relación entre las coordenadas reales y las coordenadas máquina se obtiene de

$$\begin{aligned}x &= (LC2 + L_3C23)C1 \\y &= (LC2 + L_3C23)S1 \\z &= LS2 + L_3S23 \\\xi &= 23\end{aligned}\tag{5.14}$$

en donde  $L_3 = 0.25$  m. Los siete pasos descritos anteriormente pueden aplicarse ahora a este ejemplo.

*Paso 1.* Los incrementos requeridos en las coordenadas reales son

$$\Delta x = (0, 0.01, -0.01, 0)^T.$$

*Paso 2.* El jacobiano se construye a partir de las ecuaciones (5.14) al derivar parcialmente cada expresión con respecto a cada una de las coordenadas máquina:

$$J = \begin{bmatrix} -(LC2 + L_3C23)S1 & -(LS2 + L_3S23)C1 & C2C1 & -L_3S23C1 \\ LC2 + L_3C23 & -(LS2 + L_3S23)S1 & C2S1 & -L_3S23S1 \\ 0 & LC2 + L_3C23 & S1 & L_3C23 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

*Paso 3.* Las coordenadas máquina correspondientes a la posición inicial son (0, 0.9273, 1.25, -0.9723). (Nótese que los ángulos se expresan en *radianes*). El jacobiano en la posición inicial es por lo tanto

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0.6 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.8 & 0.25 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

*Paso 4.* La inversión del jacobiano da

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.64 & 0 & 0.48 & -0.12 \\ 0.6 & 0 & 0.8 & -0.2 \\ 0.64 & 0 & 0.48 & 1.12 \end{bmatrix}$$

**Paso 5.** Pueden calcularse ahora los incrementos en las coordenadas máquina:

$$J^{-1} \Delta X = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.64 & 0 & 0.48 & -0.12 \\ 0.6 & 0 & 0.8 & -0.2 \\ 0.64 & 0 & -0.48 & 1.12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \\ -0.01 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +0.01 \\ -0.0048 \\ -0.008 \\ +0.0048 \end{bmatrix} = \Delta \Theta$$

**Paso 6.** Se obtienen los nuevos valores de  $\Theta$ :

$$\Theta = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.9273 \\ 1.25 \\ -0.9273 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} +0.01 \\ -0.0048 \\ -0.008 \\ +0.0048 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.9225 \\ 1.242 \\ -0.9225 \end{bmatrix}$$

**Paso 7.** Se regresa al Paso 3 y se calcula un nuevo jacobiano con los valores generados en el Paso 6:

$$J = \begin{bmatrix} -0.0100 & -1.0000 & 0.6038 & 0.0000 \\ 1.0000 & -0.0100 & 0.0060 & 0.0000 \\ 0.0000 & 1.0000 & 0.7971 & 0.2500 \\ 0.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Este jacobiano se invierte y se utiliza para calcular los siguientes incrementos en las coordenadas de máquina.

El método cinemático puede evaluarse en este ejemplo comparando las coordenadas máquina que genera para los primeros pasos con los valores exactos que se obtienen con el método geométrico mediante la inversión de la ecuación (5.14). Las cifras se dan en la tabla 5.2.

### 5.5 Control continuo

Las técnicas de control geométrico y cinemático antes analizadas generan los valores y las razones de cambio requeridas de las coordenadas de máquina. Estas señales son las entradas de referencia  $r$  para los sistemas de control de cada eje y es a estos sistemas a los que ahora se dirige la atención.

En muchos casos es necesario alterar las características de un sistema, por ejemplo, para mejorar su estabilidad. Se describirán dos importantes técnicas de compensación que permitirán que la función de transferencia  $G$  de un sistema se amolde a los requerimientos. La compen-

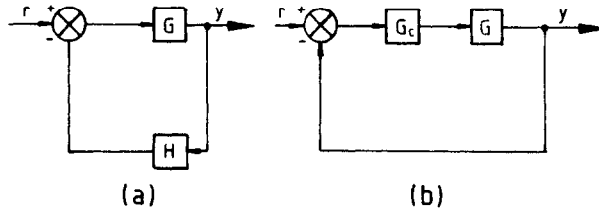
Tabla 5.2

<i>Solución cinemática</i>	<i>Solución geométrica</i>	
<i>(incrementos)</i>	<i>(Coordenadas de máquina)</i>	
	0.0000	0.0000
	0.9273	0.9273
Inicio	1.2500	1.2500
	-0.9273	-0.9273
+0.0100	0.0100	0.0100
-0.0048	0.9225	0.9225
-0.0080	1.2420	1.2420
+0.0048	-0.9225	-0.9225
+0.0100	0.0200	0.0200
-0.0048	0.9177	0.9174
-0.0079	1.2340	1.2342
+0.0049	-0.9176	-0.9174
+0.0100	0.0300	0.0300
-0.0051	0.9126	0.9124
-0.0078	1.2262	1.2264
+0.0051	-0.9125	-0.9124
+0.0100	0.0400	0.0400
-0.0052	0.9074	0.9071
-0.0077	1.2185	1.2187
+0.0052	-0.9073	-0.9071

sación de retroalimentación se refiere a la modificación de la señal de transferencia por medio de la función de transferencia  $H$  (figura 5.9(a)) y la compensación en cascada opera sobre la señal de error por medio de la función de transferencia  $G^c$  (figura 5.9(b)).

El valor práctico de los compensadores es que pueden alterar las características del sistema de una manera deseable y predecible, evitando cambios en las principales características mecánicas o eléctricas de un sistema que de cualquier otra forma resultaría indeseable. Para el caso general en donde existen compensaciones tanto de retroalimentación como en cascada, la función de transferencia del sistema es

$$\frac{y}{r}(s) = \frac{G_s G_c}{1 + G_s G_c H} = \frac{G}{1 + G H} \quad (5.15)$$



**Figura 5.9** Sistemas de malla cerrada: (a) compensación de retroalimentación  $H$ ; (b) compensación en cascada  $G_c$ .

Como se estudió antes la dinámica de los robots es fundamentalmente no lineal, lo cual provoca que un análisis exacto sea en extremo difícil. Sin embargo, a bajas velocidades y para cambios pequeños en las coordenadas, los sistemas robot se comportan en forma lineal y un análisis lineal puede redundar en resultados de gran utilidad.

### Sistemas lineales

Un sistema lineal se define como aquél cuyo comportamiento puede describirse con un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales ordinarias de primer orden; para un sistema con una entrada  $u$  y una salida  $y$ , esta definición puede resumirse por medio de las ecuaciones de estado

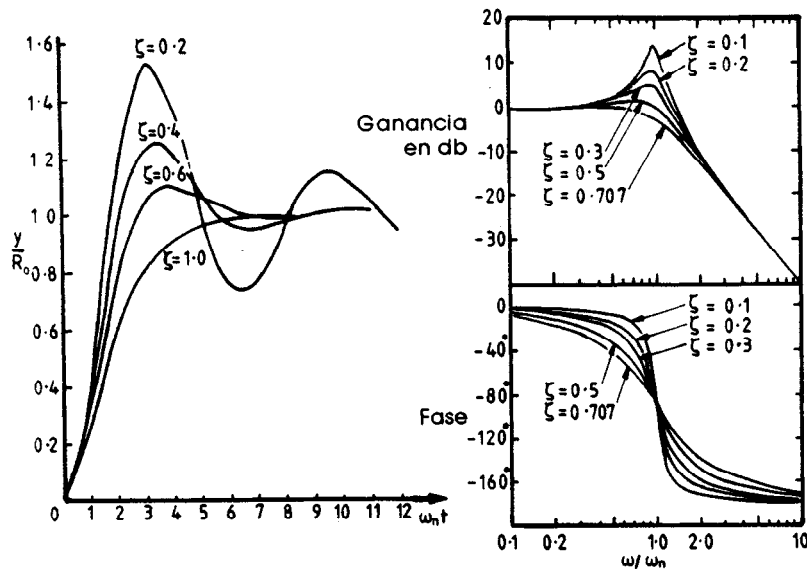
$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= C^T x\end{aligned}\quad (5.16)$$

en donde  $x$  es el vector de estado,  $A$  es una matriz  $n \times n$ ,  $n$  es el número de estados y, por lo tanto, el orden del sistema y  $B$  y  $C$  son los vectores de entrada y salida. Cuando el sistema es lineal, todos los elementos de  $A$ ,  $B$  y  $C$  son cantidades escalares.

Muchos sistemas de control con una sola entrada y una sola salida se aproximan a un sistema de segundo orden, con la función de transferencia de la forma

$$\frac{y}{r}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}\quad (5.17)$$

en donde  $s$  es el operador de Laplace,  $\zeta$  es la relación de amortiguamiento y  $\omega_n$  es la frecuencia natural, la cual es la frecuencia de la respuesta en ausencia de amortiguamiento.



**Figura 5.10** Respuestas de un sistema de segundo orden: (a) al escalón unitario  $R_0$ ; (b) a una entrada con frecuencia  $\omega$

La respuesta de un sistema como el anterior a una entrada escalón  $R_0$  es

$$\begin{aligned} \zeta < 1: \frac{y}{R_0} &= 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \exp(-\zeta \omega_n t) \sin \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \cos^{-1} \zeta \\ \zeta > 1: \frac{y}{R_0} &= 1 - \frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \exp((- \zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t) \\ &\quad + \frac{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \exp((- \zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t) \end{aligned} \quad (5.18)$$

Estas respuestas se ilustran en la figura 5.10(a). Las curvas indican elementos de estado transitorio y estable. Para  $\zeta > 0$  la salida alcanza al final un estado estable  $R_0$ . Si  $\zeta < 1$ , hay un transitorio oscilatorio con una frecuencia amortiguada  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ . Para  $\zeta > 1$  el transitorio es monótono.

La respuesta a una entrada escalón puede proveer información útil en el dominio del tiempo; respuesta en frecuencia, que es la respuesta en estado estable a entradas senoidales de distintas frecuencias, también puede ser muy útil. La figura 5.10(b) es un diagrama de Bode de la respuesta en frecuencia de un sistema de segundo orden, excitado por una



señal senoidal de amplitud  $A$  y frecuencia  $\omega$ . La ganancia en dB es  $20 \log$  (amplitud de salida/ $A$ ). Además se muestra el atraso de fase de la señal de salida.

La resonancia ocurre cerca de  $\omega_n$  y aumenta en magnitud conforme  $\zeta$  disminuye. Un elevado pico de resonancia puede resultar dañino para el equipo mecánico y debe evitarse suministrando suficiente amortiguamiento o asegurando que  $\omega_n$  sea superior a la frecuencia más alta de entrada que pudiera presentarse. Por ejemplo, resulta necesario asegurar que la frecuencia natural de un sistema de control no coincida con la frecuencia natural del eslabón del robot que controla. Se ha sugerido (Paul, 1982) que la frecuencia del sistema de control debe ser de cuando menos la mitad de la del eslabón.

### Estabilidad

Si las oscilaciones transitorias no decaen, el sistema es inestable. La falta de estabilidad puede predecirse a partir de la función de transferencia del sistema. El denominador es extremadamente importante ya que su forma determina la caracterización de la respuesta transitoria; es por esta razón que la ecuación formada al igualar el denominador a 0 se conoce como ecuación característica. Por ejemplo, la ecuación característica para la función de transferencia de la ecuación (5.17) es

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (5.19)$$

Las raíces de esta ecuación son

$$\left. \begin{array}{ll} \zeta > 1 & s = \zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \\ \zeta < 1 & s = \zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \end{array} \right\} \quad (5.20)$$

Las partes reales de estas raíces determinan la estabilidad del sistema. Por ejemplo, en las ecuaciones (5.18), las raíces reales pueden identificarse con la función exponencial. Si las raíces reales son negativas, la exponencial en última instancia disminuye hasta 0 y el sistema es estable; si son positivas, la exponencial aumenta con el tiempo y el sistema se torna inestable.

De aquí que una forma útil de probar la estabilidad consista en examinar las raíces de la ecuación característica. En el caso de un sistema de malla cerrada, esta ecuación adopta la forma

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (5.21)$$

Estas raíces se denominan también valores propios característicos o eigenvalores y, para lograr la estabilidad, deben tener partes reales negativas.

Los valores propios pueden calcularse directamente de la representación en el espacio de estados de un sistema dado que la ecuación característica es

$$|sI - A| = 0 \quad (5.22)$$

en donde  $I$  es la matriz unitaria. Por ejemplo, la representación en el espacio de estados del sistema de segundo orden es

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} r \quad (5.23)$$

$$y = [1 \ 0][x_1 \ x_2]^T \quad (5.24)$$

lo que resulta en la ecuación característica

$$[sI - A] = \begin{bmatrix} s & -1 \\ \omega_n^2 & (s + 2\zeta\omega_n) \end{bmatrix} = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (5.25)$$

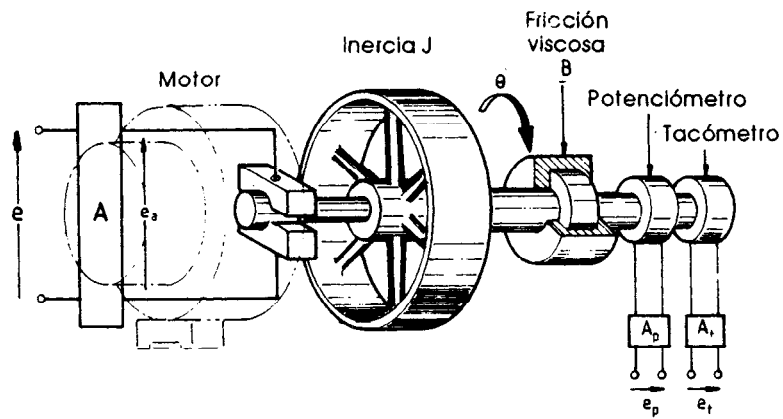
### Control de un solo eje

El método de control geométrico antes explicado se basa en la existencia de un sistema de control de malla cerrada para controlar la posición de cada articulación del robot. Las técnicas de control analizadas en la sección 5.5 podrán elaborarse ahora para suministrar este control de posición. En la figura 5.11 se muestra una carga inercial, con fricción viscosa, impulsada por un motor eléctrico. Se ha supuesto que el par del motor es proporcional al potencial suministrado. Los parámetros son

entrada al amplificador	$e(V)$
ganancia del amplificador	$A(V/V)$
salida del amplificador	$e_a(V)$
constante de par del motor	$M(Nm/V)$
par del motor	$T(Nm)$
inercia de la carga	$J(Nm^2)$
constante de fricción viscosa	$B(Nm/rad/s)$
posición de la carga	$\theta(rad)$
constante del potenciómetro	$A_p(volts/rad)$
constante del tacómetro	$A_t(volts/rad/s)$

Al aplicar la segunda ley de Newton al sistema se obtiene

$$T = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} \quad (5.26)$$

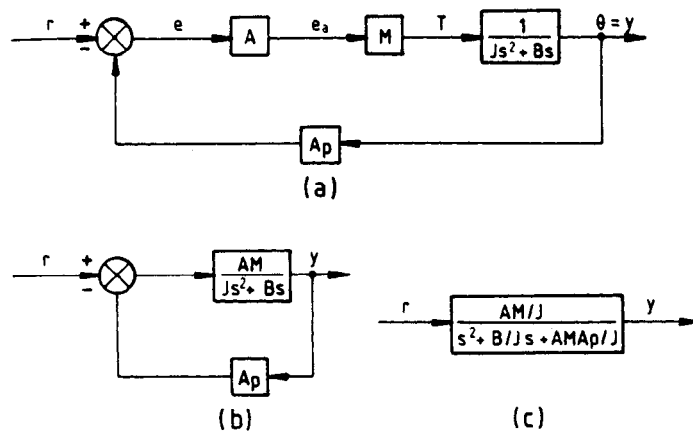


**Figura 5.11** Motor eléctrico que impulsa una carga con fricción viscosa, incorporando medición de la velocidad y la posición.

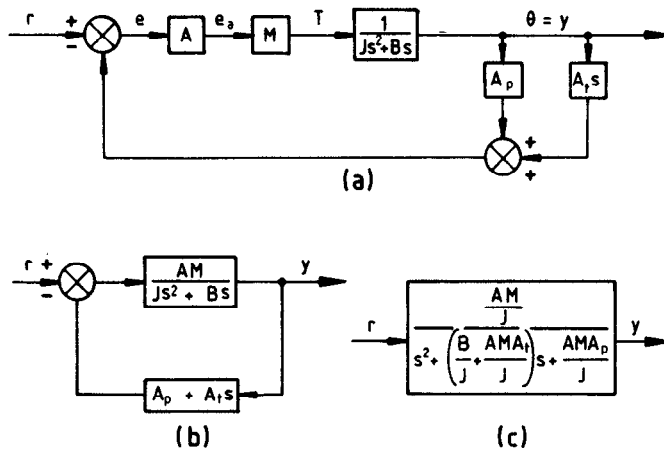
Con lo que se obtiene una función de transferencia

$$\frac{\theta}{T}(s) = \frac{1}{Js^2 + Bs} \quad (5.27)$$

Puede construirse un sistema para control de la posición usando sólo la señal del potenciómetro como se muestra en la figura 5.12(a), en donde



**Figura 5.12** Control de posición con retroalimentación de la posición: (a) control del sistema de la figura 5.11; (b) funciones de transferencia de la trayectoria directa y de la retroalimentación; (c) función de transferencia en malla cerrada.



**Figura 5.13** Control de posición con retroalimentación de la posición y la velocidad: (a) control del sistema de la figura 5.11; (b) funciones de transferencia de la trayectoria directa y de la retroalimentación; (c) función de transferencia de malla cerrada.

$r$  es la entrada de referencia y  $\theta$  es la salida  $y$ . Este sistema de control se reduce (figuras 5.12(b) y (c)) a un sistema de segundo orden con

$$\omega_m = \sqrt{\frac{AMA_p}{J}} \text{ y } \zeta = \frac{B}{\sqrt{JAMA_p}} \quad (5.28)$$

y una ganancia en estado permanente  $K = 1/A_p$ .

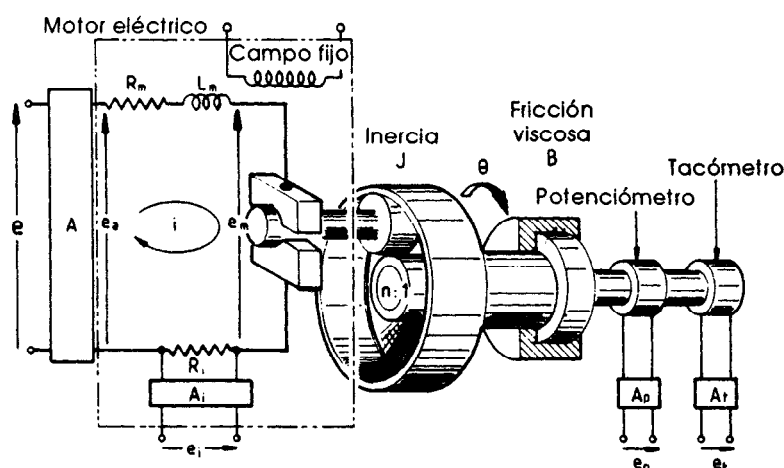
### Compensación de la retroalimentación

Con frecuencia es necesario modificar el rendimiento de un sistema de control; y las ecuaciones (5.28) muestran que aunque lo anterior puede lograrse alterando la ganancia del amplificador  $A$ , no es posible tener un control independiente de  $\omega_n$  y  $\zeta$  por este medio.

Un requerimiento común consiste en incrementar el valor de  $\zeta$  para reducir o eliminar el pico máximo en el transitorio de la respuesta. La retroalimentación de velocidad es un método para incrementar  $\zeta$  mediante la adición de compensación a la malla de retroalimentación. Como un tacómetro genera un potencial  $e_t$  proporcional a la velocidad, su función de transferencia es

$$\frac{e_t}{\theta}(s) = A_t s \quad (5.29)$$

El potencial  $e_t$  del tacómetro (figura 5.11) se añade al potencial del potenciómetro para formar una señal de retroalimentación compensada



**Figura 5.14** Motor eléctrico controlado por la armadura que impulsa una carga con fricción viscosa, incorporando medición de la posición, la velocidad y la corriente de la armadura.

(figura 5.13(a)). Al reducir el sistema a la función de transferencia en malla cerrada (figuras 5.13(b) y (c)), se muestra que sólo cambia el coeficiente de  $s$ . Esto hace que también el valor de  $\zeta$  cambie con respecto a lo que se muestra en la figura 5.12(c).

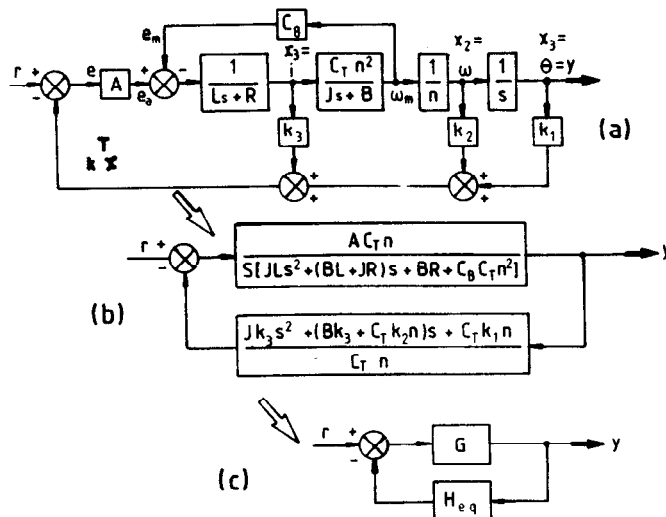
Este argumento puede ahora extenderse a un motoreductor eléctrico común en muchos robots (figura 5.14). El motor tiene una resistencia  $R_m$  y una inductancia  $L_m$  y genera una fuerza contraelectromotriz  $e_m$  que es proporcional a su velocidad angular  $\omega_m$ . Con un campo fijo, el par  $T$  del motor es proporcional a la corriente  $i$ . Esta corriente se mide al amplificar el potencial por medio de una resistencia  $R_i$  en donde  $R_i \ll R$ . La carga se lleva a una posición  $\theta$  a una velocidad  $\omega$  por medio de un reductor con una relación  $n:1$ . El sistema se modela con las ecuaciones

$$\left. \begin{aligned} e_a &= Ae & e_m &= C_B \omega_m & e_a - e_m &= Ri + Li \\ \omega_m &= n\omega & \omega &= \dot{\theta} & T &= C_T i = (J\omega_m + B\omega_m)/n^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.30)$$

y las funciones de transferencia resultantes son

$$\left. \begin{aligned} \frac{e_a}{e}(s) &= A & \frac{e_m}{\omega_m}(s) &= C_B & \frac{i(s)}{e_a - e_m} &= \frac{1}{Ls + R} \\ \frac{\omega_m}{i}(s) &= \frac{C_T m^2}{Js + B} & \frac{\omega}{\omega_m}(s) &= \frac{1}{n} & \frac{\theta}{\omega}(s) &= \frac{1}{s} \end{aligned} \right\} \quad (5.31)$$

La representación en un diagrama de bloques de estas funciones de transferencia (figura 5.15(a)) indica que el sistema es de tercer orden y dado



**Figura 5.15** Control de la posición con retroalimentación completa de estado: (a) control del sistema de la figura 5.14; (b) funciones de transferencia de la trayectoria directa y de la retroalimentación; (c) reducción  $H$  equivalente.

que  $\theta$ ,  $\omega$  e  $i$  están relacionadas sucesivamente por un orden de integración, un vector de estado válido es

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

La retroalimentación de estado es un método para lograr un control total de los coeficientes de la función de transferencia en malla cerrada y se lleva a cabo añadiendo todas las señales de estado amplificadas para formar la señal de retroalimentación

$$f = k^T x \quad (5.33)$$

en donde  $k$  es el vector de retroalimentación. En este sistema, por ejemplo,

$$f = [k_1 \quad k_2 \quad k_3] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = [A_p \quad A_t \quad A_i] \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} = A_p \theta + A_t \omega + A_i i \quad (5.34)$$

Los coeficientes de retroalimentación  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  son en realidad los ajustes de ganancia del potenciómetro, el tacómetro y los amplificadores del sensor de corriente, respectivamente. Para analizar el efecto de la retroalimentación de estado sobre el sistema en malla cerrada, el diagrama de bloques puede reducirse a la forma familiar de un sistema en malla cerrada (figuras 5.15(a), (b) y (c)). Este proceso se denomina reducción al equivalente  $H$  y genera una función de transferencia en malla cerrada

$$\begin{aligned} \frac{y}{r}(s) &= \frac{G(s)}{1 + G(s)H_{eq}(s)} \quad (5.35) \\ &= \frac{AC_T n}{JLs^3 + (BL + JR + AJk_3)s^2 + (BR + C_B C_T n^2 + ABk_3 + AC_i k_2 n)s + AC_T k_1 n} \end{aligned}$$

Todos los coeficientes de la función de transferencia en malla cerrada pueden ajustarse a los valores deseados acomodando  $A$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$ .

La estabilidad del sistema puede determinarse de nueva cuenta al examinar las tres raíces de la ecuación característica de tercer orden.

Cuando las ecuaciones  $\dot{x} = Ax + Bu$  y  $y = C^T x$  representan un sistema en malla abierta y se ha de utilizar una retroalimentación de estado completa, la función de transferencia de malla cerrada es

$$\frac{y}{r}(s) = C^T (sI - A + Bk^T)^{-1} B \quad (5.36)$$

y la ecuación característica es

$$|sI - A + Bk^T| = 0 \quad (5.37)$$

en donde  $k$  es el vector de retroalimentación. El lector puede desear confirmar que las ecuaciones de estado

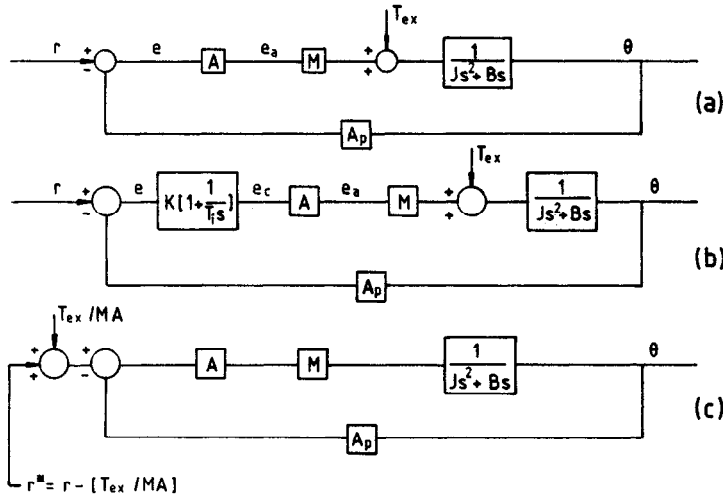
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & (-B/J) & (C_T n/J) \\ 0 & (-C_B n/L) & (-R/L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A/L \end{bmatrix} u \\ y &= [1 \ 0 \ 0]x \end{aligned} \quad (5.38)$$

son una representación válida para el ejemplo dado y que las ecuaciones (5.36) a (5.38) generan una función de transferencia de ciclo en malla cerrada congruente con las ecuaciones (5.35).

### Compensación en cascada

Se ha visto que la incorporación de una señal de velocidad (es decir, una derivada) a una señal de retroalimentación de posición (es decir, proporcional) tiene un efecto estabilizador sobre un sistema de control. La incorporación adicional de una señal integral puede eliminar algunos de los errores en estado permanente. El tipo más común de compensador en cascada es el controlador proporcional integral derivativo (PID) o controlador de tres términos. El controlador PID opera en la señal de error y tiene una función de transferencia de la forma

$$G_c(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (5.39)$$



**Figura 5.16** Eliminación de errores en régimen permanente debidos a cargas de gravedad: (a) malla cerrada con par de perturbación  $T_{ex}$ ; (b) control proporcional e integral; (c) punto de referencia modificado.

en donde  $K$  es la ganancia,  $T_i$  es la constante de tiempo integral y  $T_d$  es la constante de tiempo del derivador.

El efecto del término integral se demuestra mediante una referencia al sistema para control de la posición de la figura 5.11. El diagrama de bloques de la figura 5.16(a) es similar al de la figura 5.12(a), pero en esta ocasión se ha añadido un par de perturbación constante  $T_{ex}$  al sistema. Se mostró anteriormente que los componentes de gravedad proveen estos pares en los sistemas prácticos. El par aplicado a la carga es ahora

$$T = Me_a + T_{ex} \quad (5.40)$$

y la salida puede determinarse a partir de la ecuación

$$(Js^2 + Bs + MAA_p)\theta = MA r + T_{ex} \quad (5.41)$$

La condición de estado estacionario se determina al hacer  $s = 0$  (las razones de cambio son 0), lo que resulta en

$$\theta_{ss} = (r_{ss}/A_p) + (T_{ex}/MAA_p) \quad (5.42)$$

De esta forma, la presencia de un par constante de perturbación ha generado un error en la salida de magnitud  $(T_{ex}/MAA_p)$ .

Este error en estado estacionario puede eliminarse mediante el empleo de un término integral en la ecuación del controlador. Ignorando el término derivativo en el controlador PID, se tiene



$$\frac{e_c}{e}(s) = K(1 + \frac{1}{T_i s}) \quad (5.43)$$

en donde  $e_c$  es una señal compensada.

El diagrama de bloques resultante se muestra en la figura 15.16(b). Es fácil demostrar que

$$\left| Js^2 + Bs + MAK A_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \right| \theta = MAK \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) r + T_{ex} \quad (5.44)$$

$$[Js^3 + Bs^2 + MAK A_p s + MAK A_p / T_i] \theta = [MAK s + MAK / T_i] r + s T_{ex}.$$

La ecuación característica es ahora de tercer orden. Las condiciones de estado estacionario pueden determinarse al hacer  $s = 0$ , lo que resulta en

$$\theta_{ss} = r_{ss} / A_p \quad (5.45)$$

lo cual es equivalente al sistema original no perturbado y no compensado.

### **Otros métodos para eliminar los errores debidos a cargas de gravedad**

Si se conocen los pares de perturbación (es decir, si estos pares no son aleatorios), entonces es posible compensar su presencia por medio de la modificación de la entrada de referencia.

En la figura 5.16(c) se muestra la manipulación requerida en el diagrama de bloques. La entrada de referencia modificada resultante es

$$r^* = r - (T_{ex} / MA) \quad (5.46)$$

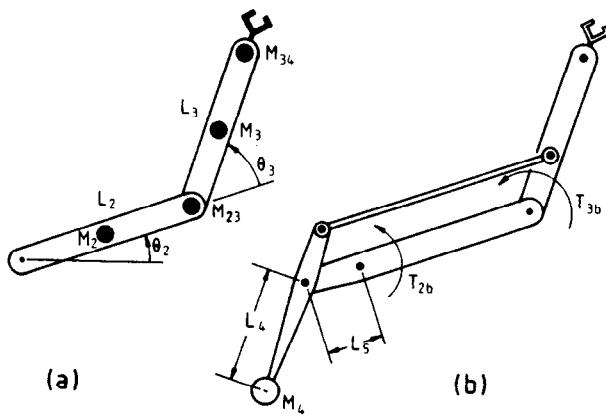
Estos pares externos con frecuencia pueden ser de gran magnitud en los sistemas robot. También son no lineales con respecto a las coordenadas máquina y requieren una computadora para su cálculo. Por ejemplo, en el sistema con tres grados de libertad de la figura 5.6 (repetido en parte en la figura 5.17(a)), los pares de gravedad son

$$\text{Articulación 2: } T_{2ex} = [M_a L_2 C \theta_2 + 0.5 M_b L_3 C(\theta_2 + \theta_3)]g \quad (5.47)$$

$$\text{Articulación 3: } T_{3ex} = -[0.5 M_b L_3 C(\theta_2 + \theta_3)]g \quad (5.48)$$

en donde  $M_a = 0.5m_2 + m_{23} + m_3 + m_{34}$  y  $M_b = m_3 + 2m_{34}$ .

También es posible eliminar estos pares de perturbación por medios mecánicos (figura 5.17(b)). Este método es en particular útil para máquinas que se programan por enseñanza cuando es deseable que un robot mantenga



**Figura 5.17** Balanceo: (a) manipulador desbalanceado; (b) manipulador balanceado.

una posición dada cuando se elimina la fuerza manual. En la figura 5.17(b) se muestra un enlace paralelo ligero que soporta una masa  $M_4$ . Al tomar los momentos sobre el codo y el hombro (o usando el método de Lagrange del apéndice II) se aprecia que el peso  $M_4g$  provee los pares de balance  $T_{2b}$  y  $T_{3b}$  en donde

$$T_{2b} = M_4g[L_4C(\theta_2 + \theta_3) + L_5C\theta_2] \quad (5.49)$$

y

$$T_{3b} = M_4gL_4C(\theta_2 + \theta_3) \quad (5.50)$$

Por lo tanto, la articulación 3 está balanceada cuando

$$T_{3ex} + T_{3b} = 0$$

o cuando

$$M_4L_4 = 0.5M_bL_3 \quad (5.51)$$

La articulación 2 está balanceada cuando

$$T_{2ex} + T_{2b} = 0$$

y cuando se satisface la ecuación (5.51) esto se reduce a

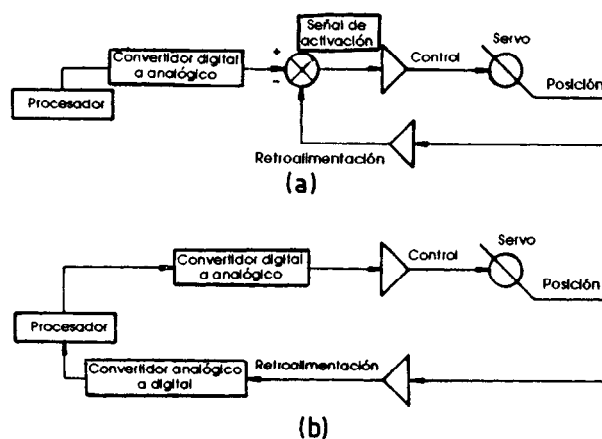
$$M_4L_5 = M_aL_2 \quad (5.52)$$

Por lo tanto, si  $M_4$ ,  $L_4$  o  $L_5$  se determinan en forma arbitraria, las ecuaciones (5.51) y (5.52) permiten determinar los dos parámetros restantes.

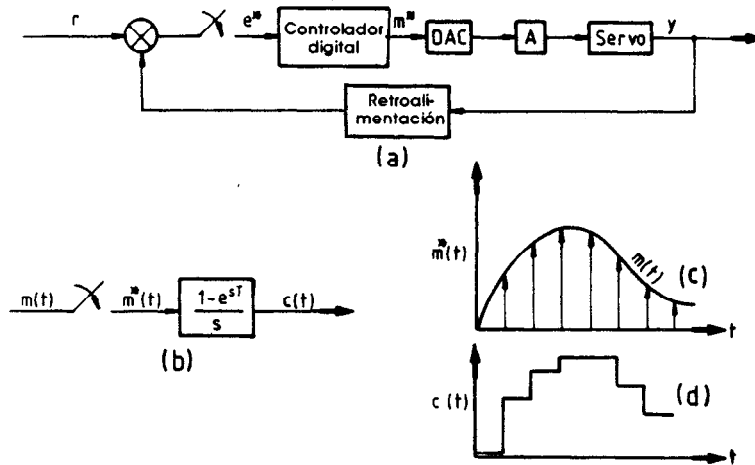
## 5.6 Control digital

Con el fin de hacer funcionar los sistemas de control de posición de un robot, la computadora necesita calcular las coordenadas de máquina deseadas y, a su vez, los valores de los puntos de referencia necesarios. Los puntos de referencia requieren que los sistemas de control los desplacen a las coordenadas de máquina deseadas. Los puntos de referencia son valores digitales que se comunican a los sistemas de control a través de convertidores de señales digitales a señales analógicas (CDA) como se muestra en la figura 5.18(a).

La respuesta de un sistema de control continuo para un robot no se puede predecir de manera analítica debido a la naturaleza no lineal de la dinámica del robot y para mejorar el rendimiento del sistema de control a lo largo de todo el intervalo de movimiento puede resultar conveniente o deseable alterar no solamente el punto de referencia sino también los parámetros del controlador mismo. Aun cuando esto es posible con algunos sistemas continuos, una solución mucho más práctica y versátil consiste en hacer que el procesador sea parte del sistema de control (figura 5.18(b)) (véase Baruh y colaboradores, 1980; Turner y colaboradores, 1984; Patzelt, 1982). La incorporación de un convertidor analógico a digital (CAD) es necesaria para permitir que el procesador muestree la señal de retroalimentación. El funcionamiento de los convertidores analógico digital y digital analógico se analiza en el capítulo 6.



**Figura 5.18** Control de la posición de un punto de referencia digital:  
 (a) conversión del punto de referencia a una señal analógica para un control continuo del sistema; (b) estrategia de control puesta en práctica por medio de un algoritmo de procesamiento.



**Figura 5.19** Control digital: (a) controlador digital en un sistema continuo; (b) muestreo con retenedor de orden cero; (c) forma de onda de la salida del controlador; (d) salida del retenedor de orden cero.

### Desempeño del sistema de control digital

El sistema de control que se muestra en la figura 5.18(a) se analiza considerando que funciona como se muestra en la figura 5.19(a). La señal de accionamiento se muestrea a intervalos de tiempo  $T$ , en donde el asterisco denota la cantidad muestreada. El controlador digital actúa sobre la señal de accionamiento muestreada  $e^*$ ; su salida  $m^*$ , transformada en una señal analógica, deriva al servomecanismo. Un dispositivo común para este convertidor analógico digital es el retenedor de orden cero, cuyas salida y entrada así como su equivalente en el dominio de Laplace se muestran en las figuras 5.19(b), (c) y (d).

### Controlador PID digital

El establecimiento del algoritmo de control para simular un controlador PID servirá para ilustrar el principio (Erdelyi y colaboradores, 1980). La derivada de una función continua del tiempo  $f(t)$  se puede aproximar por

$$\dot{f}(t) = \frac{f(k) - f(k-1)}{T} \quad (5.53)$$

en donde  $f(k)$  es el valor actual de  $f(t)$ ,  $f(k-1)$  es el valor anterior de  $f(t)$ , es decir,  $f(t-T)$ , y  $T$  es el intervalo durante el cual se realiza el muestreo.

El algoritmo instrumenta el control PID:

$$m(s) = K\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) e(s) \quad (5.54)$$

Si se reescribe lo anterior como

$$sm(s) = K \left[ se(s) + \frac{1}{T_i} e(s) + T_d s^2 e(s) \right]$$

y se observa que  $sf(s)$  es la transformada de  $\dot{f}(t)$ , se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{m(k) - m(k-1)}{T} &= K \left[ \frac{e(k) - e(k-1)}{T} + \frac{1}{T_i} e(k) + T_d \frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T^2} \right] \end{aligned}$$

que genera la ecuación en diferencias

$$\begin{aligned} m(k) &= m(k-1) + K \left( 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(k) - k \left( 1 + \frac{2T_d}{T} \right) e(k-1) + KT_d e(k-2) \\ &= m(k-1) + a_1 e(k) - a_2 e(k-1) + a_3 e(k-2) \end{aligned} \quad (5.55)$$

La ecuación en diferencias para calcular el error  $e$  es

$$e(k) = r(k) - f(k) \quad (5.56)$$

en donde  $r(k)$  es el punto de referencia actual y  $f(k)$  es el valor actual de retroalimentación. Las ecuaciones (5.55) y (5.56) representan el cálculo del valor de la señal de control  $m^*$ , la cual es transportada en cada intervalo de muestreo. Es necesario que el procesador almacene el valor previo de su salida, es decir,  $m(k-1)$  y los dos valores de error previos, es decir,  $e(k-1)$  y  $e(k-2)$ .

La formulación de la ecuación en diferencias se basa en la ecuación (5.53), la cual es una aproximación. La frecuencia de muestreo está limitada por la velocidad de procesamiento y conforme se reduce el intervalo de muestreo el desempeño del controlador digital se asemeja cada vez más al de su equivalente continuo.

## 5.7 Sistemas de control en robots

Los análisis anteriores sirven para ilustrar la difícil naturaleza del problema de control en los robots y sirve para volver a enfatizar la importancia de las computadoras como parte de los sistemas de control en éstos. Las cargas de computación son elevadas incluso en aquellos sistemas en los que pueden ignorarse las dinámicas no lineales y un análisis cinemático resulta satisfactorio.

### Controladores de posición

En los controladores de posición las coordenadas de máquina deseadas, determinadas por la inversión de las coordenadas reales, se utilizan como puntos de referencia para ubicar a los servos en cada uno de los ejes. En secciones anteriores de éste y otros capítulos se ha hecho notar la complejidad de la transformación de inversión. Por ejemplo, el robot *Unimate*, a pesar de contar con características cinemáticas que facilitan el análisis, requiere las siguientes operaciones: 30 multiplicaciones o divisiones, 15 sumas o restas, 3 raíces cuadradas, 7 potencias al cuadrado, 6 cosenos o senos y 6 arcotangentes. La utilización de robots con topologías en paralelo puede reducir el número de cálculos requeridos y en los robots seriales la ecuación puede simplificarse en gran medida si se utilizan tres ejes intersecantes, por lo general en la muñeca.

El tiempo para el cálculo representa un problema dado que por lo general es necesario transmitir comandos a los servos de las articulaciones a aproximadamente 50 Hz. Si esto no es posible entonces puede utilizarse el método de planeación de la trayectoria, en el cual las transformaciones se llevan a cabo y se almacenan antes de iniciarse el proceso. Si es esencial contar con una operación en tiempo real, entonces el empleo de un control de rapidez puede reducir hasta cierto punto la carga de cómputo.

### Controladores de rapidez

En los controladores de rapidez se utiliza el jacobiano inverso para determinar los puntos de referencia para los servos de rapidez.

Se tiene

$$\dot{\Theta} = J^{-1}(\Theta)\dot{X} \quad (5.57)$$

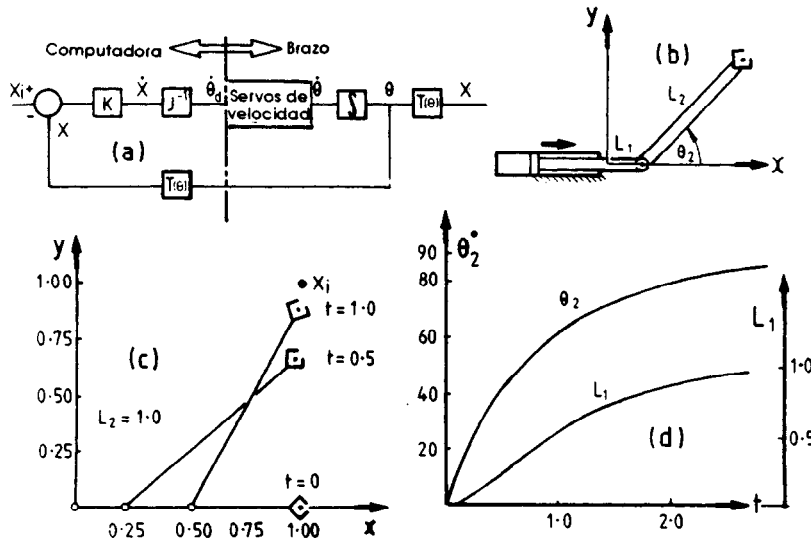
Es evidente que será deseable desacoplar el sistema de manera que una sola entrada controle una sola salida. Esto puede lograrse haciendo que el vector de velocidad en coordenadas reales  $\dot{X}$  sea proporcional al vector de error en coordenadas reales  $(X_i - X)$  o

$$\dot{X} = K(X_i - X) \quad (5.58)$$

en donde la matriz de ganancia  $K$  debe ser diagonal si se desea lograr el desacoplamiento. Por lo tanto

$$\dot{\Theta} = J^{-1}(\Theta) K (X_i - X) \quad (5.59)$$

En la figura 5.20(a) se muestra que los resultados de este cálculo se utilizan como puntos de referencia para los servos de rapidez. Con el fin



**Figura 5.20** Control de rapidez desacoplado: (a) diagrama de bloques; (b) un sistema simple con dos grados de libertad; (c) configuración en distintos tiempos; (d) variación de las coordenadas de máquina con el tiempo.

de determinar el vector  $X$  en coordenadas reales, es necesario recurrir a la transformación directa  $X = T(\Theta)$ .

Un ejemplo sencillo ayudará a clarificar el funcionamiento de este tipo de sistema. En la figura 5.20(b) se muestra un manipulador con dos grados de libertad, con una coordenada de máquina lineal ( $L_1$ ) y otra giratoria ( $\theta_2$ ). Se tiene

$$\left. \begin{aligned} x &= L_1 + L_2 C\theta_2 \\ y &= L_2 S\theta_2 \end{aligned} \right\} \quad \text{o} \quad X = T(\Theta) \quad (5.60)$$

Por derivación

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -L_2 S\theta_2 \\ 0 & L_2 C\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad \text{o} \quad \dot{X} = J(\Theta) \dot{\Theta}$$

Por lo tanto

$$J(\Theta)^{-1} = \frac{1}{L_2 C\theta_2} \begin{bmatrix} L_2 C\theta_2 & L_2 S\theta_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En las figuras 5.20(c) y (d) se muestran las respuestas a un requerimiento  $[1, 1]^T$ , que comienza desde un vector inicial en coordenadas reales  $[1, 0]^T$ .

La longitud  $L_2$  es la unidad y se asume un tiempo de actualización de 0.1 segundos. Las ganancias del servo se fijan en 4 m/s/m. Se utiliza el siguiente algoritmo:

- Paso 1. Calcular el valor inicial de  $X$  a partir del valor inicial de  $\Theta$ , es decir, usando  $T$
- Paso 2. Calcular  $\dot{X}$  a partir de  $\dot{X} = K(X_i - X)$
- Paso 3. Calcular  $\dot{\Theta}_d$  a partir de  $\dot{\Theta}_d = J^{-1}(\Theta)\dot{X}$
- Paso 4. Suponer  $\ddot{\Theta} = \dot{\Theta}_d$
- Paso 5. Tomar  $\Delta \Theta = 0.5 \ddot{\Theta} \Delta t$
- Paso 6. Actualizar  $\Theta$  con  $\Delta \Theta$
- Paso 7. Calcular  $X$  a partir de  $X = T(\Theta)$
- Paso 8. Regresar al Paso 2.

En la práctica sería suficiente actualizar el valor  $J^{-1}(\Theta)$  en periodos alternados de muestreo. El problema de calcular  $T(\Theta)$  podría simplificarse si los transductores de medición incorporan codificadores de senos y cosenos.

### Control dinámico

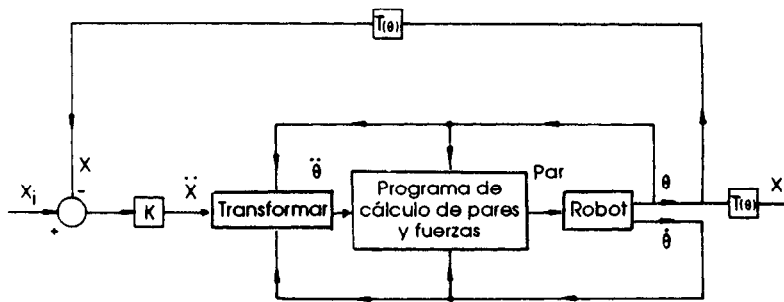
Un estudio detallado de los sistemas de control que tome en cuenta todos los elementos dinámicos de un robot va más allá del alcance de este libro. En la primera parte de este capítulo se formularon las ecuaciones dinámicas de un robot con tres grados de libertad. Se mostró que, conociendo las coordenadas de máquina y su primera y segunda derivadas, era posible calcular las fuerzas y pares requeridos de los diversos accionadores. Lo anterior forma la base de un sistema de control de fuerza y par en el cual se determinan puntos de referencia para los controladores de fuerza y par a partir de las ecuaciones dinámicas. Sin embargo, un sistema de control desarrollado sobre esta base será en esencia de malla abierta, que supondría que el par aplicado dará como resultado los movimientos deseados.

En el control desacoplado en malla cerrada interviene una matriz diagonal que relaciona a  $X$  con  $(X_i - X)$ ; es decir,

$$\dot{X} = K(X_i - X) \quad (5.61)$$

en donde  $X$  es el vector en coordenadas reales. En la figura 5.21 se muestra el diagrama de bloques para el sistema resultante. Existen tres tareas de cómputo muy importantes: la transformación de  $\dot{X}$  a  $\ddot{\Theta}$ , la determinación de los pares y la transformación directa de  $T$  de coordenadas de máquina a coordenadas reales. Ya se han examinado las últimas dos de estas tres tareas. Pero resulta necesario detallar aún más la primera; en general





**Figura 5.21** Una forma elemental de un control de aceleración desacoplado.

$$\dot{X} = J(\Theta) \dot{\Theta}$$

por lo tanto,

$$\ddot{X} = J(\Theta) \ddot{\Theta} + L(\Theta, \dot{\Theta}) \quad (5.62)$$

Por ejemplo, en la anterior ilustración de un sistema controlado en base a la rapidez, esta relación adoptó la forma

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \ddot{L}_1 - \ddot{\theta}_2 L_2 S \theta_2 - \dot{\theta}_2^2 L_2 C \theta_2 \\ \ddot{y} &= \ddot{\theta}_2 L_2 C \theta_2 - \dot{\theta}_2^2 L_2 S \theta_2 \end{aligned} \quad (5.63)$$

Así, conociendo las señales  $\ddot{x}$  e  $\ddot{y}$  del controlador  $K$  y las coordenadas máquina muestreadas y sus velocidades, es posible resolver la ecuación para las aceleraciones  $\ddot{L}_1$  y  $\ddot{\theta}_2$ . Estas, a su vez, se alimentan al programa de fuerza y par, que también requiere los valores muestreados de  $\Theta$  y  $\dot{\Theta}$ . El objetivo general es obtener un sistema de control desacoplado en el cual un valor de entrada controle una coordenada real.

El sistema de la figura 5.21 tendería a generar una respuesta oscilatoria y en la práctica sería necesaria alguna forma de incrementar la estabilidad: posiblemente una retroalimentación de la rapidez de cambio del vector en coordenadas reales. Un recuento más detallado de estos controladores puede encontrarse en Lee (1982), Luh y colaboradores (1980b) y Coiffet (1983a).

## 5.8 Resumen

El PLC es un controlador de secuencias adecuado para dispositivos de selección y colocación en donde el control de la posición se logra por medio de topes o fines de carrera mecánicos. Para un robot se requiere un control de posición en malla cerrada y el modelo dinámico

muestra que este tipo de control es extremadamente no lineal. Los sistemas digitales permiten que los parámetros se alteren para brindar un control óptimo durante todo el volumen de trabajo, pero los sistemas de control continuo todavía se utilizan en forma extensa. Se requiere, asimismo, una computadora para llevar a cabo las complejas transformaciones entre coordenadas reales y coordenadas de máquina. Los controles geométrico y cinemático son dos soluciones basadas en forma única en los elementos cinemáticos del manipulador y no toman en cuenta los efectos dinámicos. El uso de un controlador de rapidez permite el control desacoplado de la posición de un robot y es posible lograr un control dinámico completo aun cuando deban satisfacerse pesadas cargas de cómputo.

# Capítulo 6

## *Componentes de la retroalimentación*

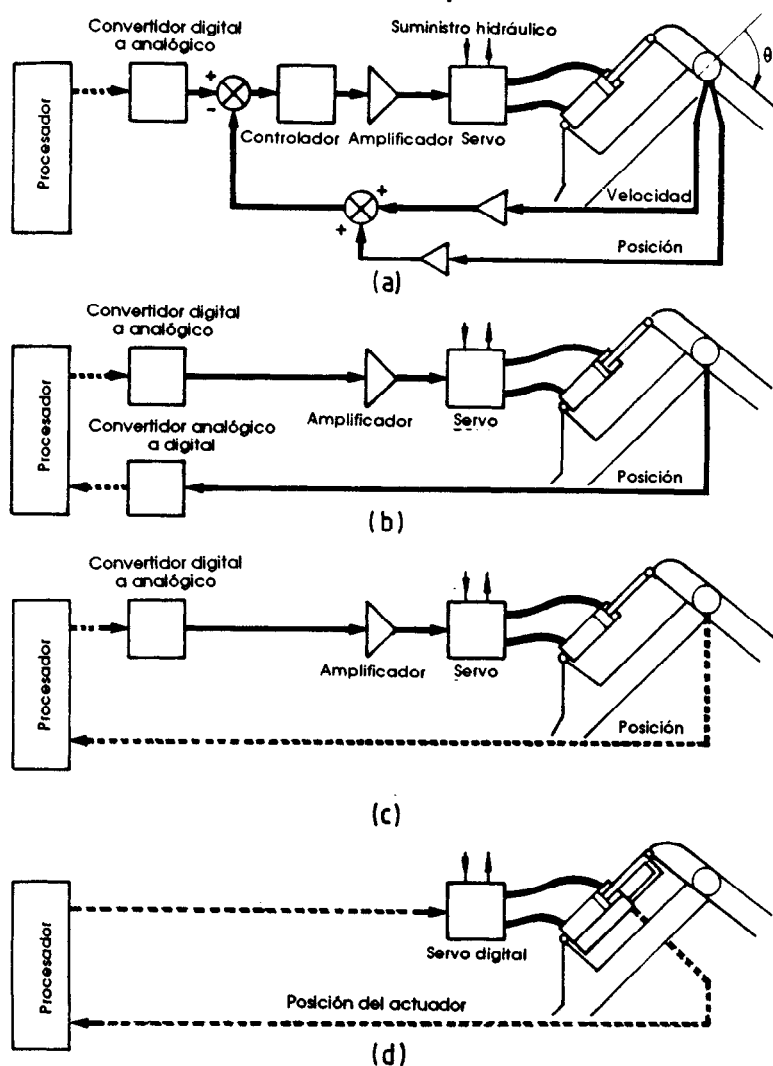
---

### 6.1 Introducción

Se ha demostrado que es necesario un control de malla cerrada si se requiere ubicar con precisión el brazo de un robot en presencia de perturbaciones como cargas de gravedad. Dado que es necesario contar con capacidad de cómputo para realizar la transformación de las coordenadas de máquina a partir de coordenadas reales, los valores requeridos de las coordenadas máquina se originan como información digital en una computadora. En la figura 6.1 se muestran cuatro diseños de sistemas de control, cada uno de los cuales sirve para colocar el codo de un robot en un ángulo  $\theta$ , donde el valor del punto de referencia de  $\theta$  es la salida digital de un procesador. En todos los diagramas de la figura 6.1, una línea continua representa una señal analógica y una línea punteada representa una señal digital.

En la figura 6.1(a) se muestra el punto de referencia transformado a una cantidad analógica por medio de un convertidor digital analógico (CDA) y esta señal activa un sistema común de control continuo. Las señales de retroalimentación de la posición y la velocidad se restan de la entrada y un controlador actúa sobre la señal resultante, la cual se amplifica para activar una servoválvula y un activador electrohidráulicos. Si el dispositivo para medir la posición que se utiliza es un resolovedor, la señal de posición se representa por el cambio de fase relativa de dos ondas senoidales. Esta señal deberá transformarse a un potencial compatible con el de la señal de retroalimentación de la velocidad, el cual puede ser el potencial de corriente directa de un tacómetro. El amplificador acepta una

## Componentes de la retroalimentación



**Figura 6.1** Sistema para control de la posición: (a) control continuo en malla cerrada; (b) control digital con medición analógica; (c) control digital con medición digital; (d) control digital con servo digital.

señal de potencial del controlador y genera una salida de corriente para activar la servoválvula electrohidráulica.

En la figura 6.1(b) se muestra un método para instrumentar un control digital en el mismo sistema. La señal analógica de posición se alimenta a un convertidor analógico a digital (CAD) el cual suministra al procesador una representación digital de la posición. La estrategia de control la impone el procesador; no se requiere una retroalimentación de la

velocidad ya que ésta puede inferirse con el algoritmo de control a partir de la razón de cambio de la posición o rapidez. Debe notarse que, en este caso, la salida del procesador está relacionada al error y no al punto de referencia como en la figura 6.1(a).

El uso de un dispositivo digital para medir la posición, es decir, un codificador, elimina la necesidad de un convertidor analógico digital que simplifica el sistema como se muestra en la figura 6.1(c). Un concepto de la futura dirección de los robots (Albus, 1981) se muestra en la figura 6.1(d). El convertidor digital analógico se ha eliminado mediante el empleo de un servo digital, un dispositivo que acepta directamente las señales digitales y genera un flujo de fluido hidráulico a una velocidad proporcional. Debe notarse que, en este caso, el codificador mide la posición del vástago del cilindro en lugar de la posición de la articulación.

La explicación anterior sirve para destacar parte del equipo y las técnicas de detección y medición que son necesarios para la puesta en práctica de un control de malla cerrada, sin importar si la variable controlada es la posición, la velocidad o, en algunos casos, la fuerza. Los temas que se han de cubrir en este capítulo son, por lo tanto:

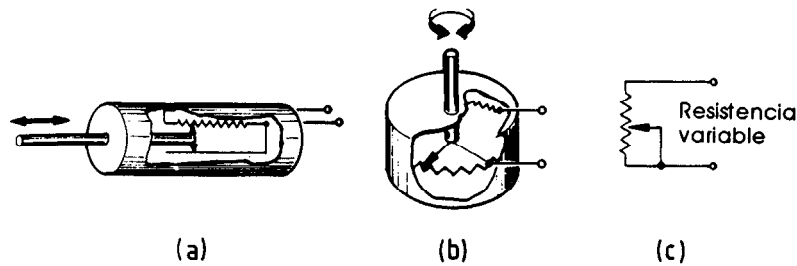
- detección y medición de la posición
- medición de la velocidad
- medición de la fuerza
- conversión digital a analógica
- conversión analógica a digital
- interfases

Aunque parte del material incluido en este capítulo puede resultar aplicable a los sensores externos que se analizan en el capítulo 8, el propósito fundamental de este capítulo es analizar la detección y la medición de las variables internas del robot, es decir, los métodos utilizados para permitir el control directo de la posición o de la trayectoria del efector final.

## **6.2 Detección y medición de la posición**

Existen muchos dispositivos para medir la posición; éstos generan una gran variedad de señales que pueden o no ser directamente compatibles con un sistema de control en particular. En esta sección se analiza el equipo necesario para medir la posición; el procesamiento de las señales para permitir su compatibilidad se cubre en las secciones 6.5 y 6.6

Es importante hacer notar que la detección de la posición, es decir, la detección del hecho de que se ha alcanzado una cierta posición, es distinta de la medición de la posición, en la que interviene el acoplamiento de un transductor al punto de interés y a partir de cuya salida puede inferirse una medida de la posición con un cierto grado de precisión.



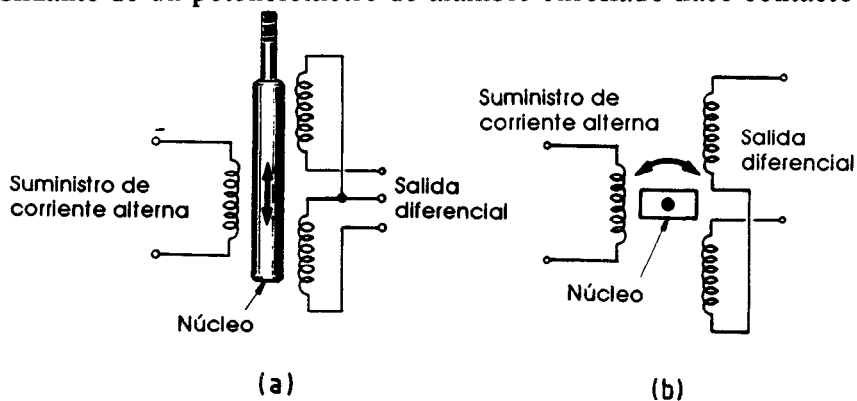
**Figura 6.2** Potenciómetro: (a) lineal; (b) giratorio; (c) circuito eléctrico.

Todos los dispositivos que se describen en esta sección incluyen una parte móvil acoplada a un eslabón que sostiene el cuerpo del dispositivo en el otro extremo de la articulación. Por lo tanto, todos estos dispositivos miden el movimiento relativo de dos eslabones de un manipulador, es decir, una coordenada de máquina, aun cuando la forma geométrica del movimiento de la articulación no será necesariamente la misma que la del dispositivo de medición.

### **Medición de la posición por medio de una resistencia variable**

Puede emplearse un potenciómetro para medir la posición lineal o angular. En las figuras 6.2(a) y (b) se muestran respectivamente potenciómetros lineales y de rotación. El movimiento del eje de entrada causa que la resistencia del dispositivo cambie de 0 al valor máximo; el circuito se muestra en la figura 6.2(c).

La resistencia del estator de un potenciómetro puede ser de alambre enrollado o estar fabricada con plástico conductor. Por lo tanto, el contacto deslizante de un potenciómetro de alambre enrollado hace contacto sola-



**Figura 6.3** Transformador diferencial variable; (a) lineal (LVDT); (b) giratorio (RVDT).

mente en  $n$  posiciones sobre su desplazamiento, en donde  $n$  es el número de vueltas de la resistencia. Esto afecta la resolución del dispositivo; por ejemplo, la resolución de un potenciómetro de 100 vueltas no puede ser mejor a un 1 %. Los potenciómetros a base de plásticos conductores, aun cuando no presentan este fenómeno, son más susceptibles a los efectos de la temperatura.

#### ***Medición de la posición por medio de un transformador diferencial variable***

El transformador diferencial variable lineal (LVDT) consiste en dos devanados secundarios idénticos excitados por un devanado primario. Los devanados secundarios se conectan en oposición, como se muestra en la figura 6.3(a), de manera que la salida sea realmente la diferencia entre sus potenciales. Con un núcleo ferromagnético en la posición central (nula), o removido completamente, la inductancia mutua entre el devanado primario y cada uno de los devanados secundarios es igual; el potencial a través de cada devanado secundario es por lo tanto igual y el potencial diferencial de salida es 0. El transformador diferencial variable rotatorio (RVDT) produce un efecto similar a través de  $180^\circ$  mediante la rotación de un núcleo con una forma especial (figura 6.3(b)). Dentro de estos límites, el potencial de la salida diferencial es proporcional al desplazamiento del núcleo a partir de la posición nula y el cambio de fase de la salida indica la dirección del desplazamiento.

#### ***Medición de la posición por medio de un resoledor***

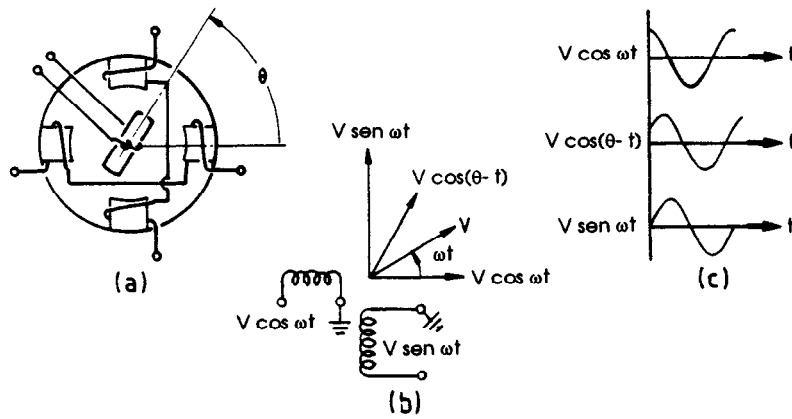
En la figura 6.4(a) se muestra una vista simplificada de la forma en que está construido un resoledor; éste es un dispositivo con el que se obtiene una medición muy precisa de la posición angular. El estator tiene dos devanados, dispuestos a ángulos rectos uno con respecto al otro, a los cuales se aplican potenciales alternos con una diferencia de fase de  $90^\circ$  (figura 6.4(b)). El potencial de salida se recolecta a través de escobillas y anillos deslizantes desde los devanados del rotor; éste es un potencial alterno con la misma amplitud que las entradas, pero con la fase cambiada.

Considérese el rotor colocado a un ángulo  $\theta$ , definido en la figura 6.4(a); tomará un componente  $V \cos \theta \cos \omega t$  de la entrada coseno y un componente  $V \sin \theta \sin \omega t$  de la entrada seno.

El potencial de salida  $V_o$  es la suma de estos componentes:

$$\left. \begin{aligned} V_o &= V \cos \theta \cos \omega t + V \sin \theta \sin \omega t \\ &= V \cos (\theta - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

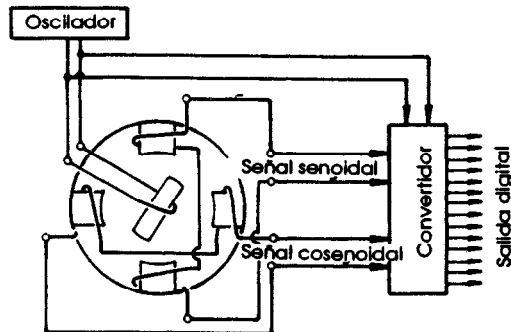
Este resultado puede confirmarse considerando la figura 6.4(b). El campo magnético resultante debido a las entradas de seno y coseno tiene



**Figura 6.4** Resolver: (a) construcción; (b) potenciales aplicado y resuelto; (c) relaciones de fase.

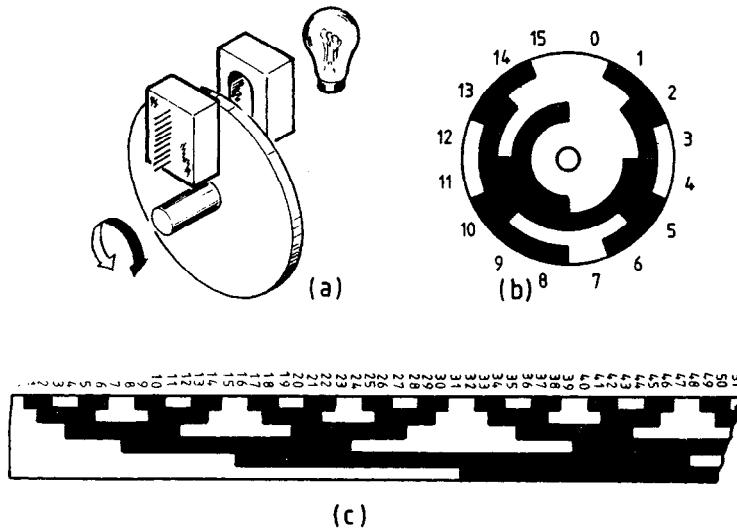
una amplitud constante y gira con una velocidad angular uniforme  $\omega$  rad/s. En cualquier instante el ángulo entre el rotor y el campo resultante es  $(\theta - \omega t)$ , de manera que el potencial inducido a través del rotor es  $V$  multiplicado por el coseno del ángulo entre  $V$  y el rotor, lo cual confirma la ecuación (6.1).

En las figuras 6.4(a) y (b) el rotor se muestra en un ángulo  $\theta$  de  $60^\circ$  respecto a la referencia, que es el eje del devanado coseno de entrada. En la figura 6.4(c) se muestra la relación de la señal de salida  $V \cos(\theta - \omega t)$  con las señales de entrada para  $\theta = 60^\circ$ . Dado que la cantidad por medir se representa por el cambio de fase relativo de las señales alternas, el resolver está libre de errores derivados de caídas de potencial o ruidos eléctricos inducidos en las líneas desde los circuitos del oscilador y de medición.



**Figura 6.5** Sistema de medición digital absoluta usando un resolver sin escobillas.





**Figura 6.6** Codificador de posición absoluta: (a) construcción; (b) disco giratorio de cuatro bit; (c) parte de una máscara lineal de seis bit.

Existen resolvidores sin escobillas en los cuales la señal de salida se genera con un transformador giratorio, que elimina la necesidad de contar con escobillas y anillos deslizantes. En la figura 6.5 se ilustra un ejemplo práctico del uso de un resolvidor sin escobillas (Lanton, 1981). En este sistema, una señal CA se suministra con un oscilador al rotor del resolvidor y se monitorean los componentes seno y coseno inducidos en las espirales del estator. Todos los circuitos para procesamiento de señales y cómputo están contenidos en un circuito integrado a gran escala, el cual suministra una versión digital de 14 bit del ángulo medido, actualizada a intervalos regulares. El ángulo del rotor podrá determinarse a partir de la amplitud ya sea de la señal del coseno o de la señal del seno, pero los errores debidos al potencial se minimizan al calcular el ángulo a partir de la relación entre ambas señales.

### **Codificadores absolutos**

Un sistema de control basado en un microprocesador requiere que la información de medición se le suministre en forma digital. Más adelante se han de cubrir técnicas para transformar mediciones analógicas a información digital; en esta sección se han de considerar los codificadores absolutos; éstos son dispositivos que generan información de posición directamente en forma digital.

En la figura 6.6(a) se muestran los elementos esenciales de un codificador rotatorio. Una estrecha banda de luz, obtenida al bloquear la iluminación generada por una fuente por medio de una ranura, se dirige

hacia un arreglo de fotoceldas. El haz de luz se interrumpe con un disco giratorio y los patrones de luz recibidos por cada fotocelda en su ubicación radial particular se determinan según la distribución de elementos transparentes y opacos alrededor del anillo correspondiente en el disco. Cada fotocelda se ENCIENDE (un 1 digital) si recibe luz a través de uno de los segmentos transparentes del disco y se APAGA (un 0 digital) si la luz se ve bloqueada por un segmento opaco del disco.

En la figura 6.6(b) se muestra el patrón de un disco para un codificador de cuatro bit. En una señal dada el disco exterior contiene el bit menos significativo. El patrón de cada número en el disco se determina por medio del código Gray, no con el sistema de números binarios. La ventaja del código Gray sobre los números binarios en el caso de los codificadores puede verse al comparar las representaciones binaria y en código Gray de las dieciséis posiciones de un codificador de cuatro bit (Tabla 6.1).

Tabla 6.1

<i>Código Gray</i>	<i>Posición decimal</i>	<i>Número binario</i>
0000	0	0000
0001	1	0001
0011	2	0010
0010	3	0011
0110	4	0100
0111	5	0101
0101	6	0110
0100	7	0111
1100	8	1000
1101	9	1001
1111	10	1010
1110	11	1011
1010	12	1100
1011	13	1101
1001	14	1110
1000	15	1111
0000	0	0000

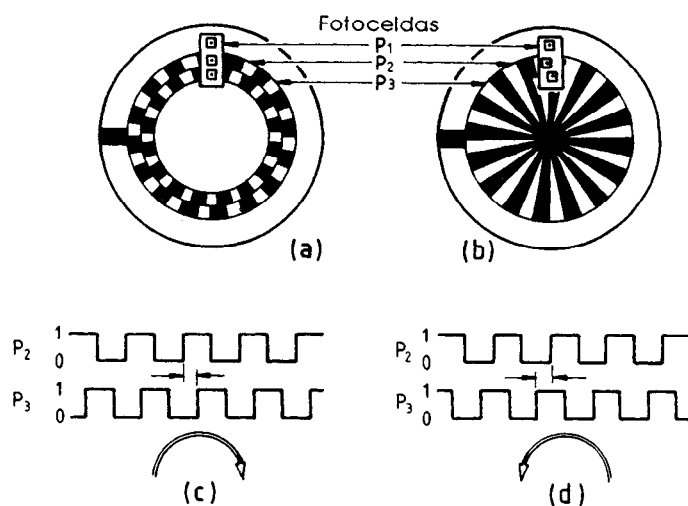
Pueden presentarse ciertas anomalías al momento de efectuarse un cambio de un segmento al siguiente. Considérese que el disco se mueve de la posición 7 a la 8. Con respecto a los números binarios, si el cambio de estado del bit más significativo de 0 a 1 se detecta antes de que los otros tres bit cambien a 0, existirá una posición entre 7 y 8 en la cual el dispositivo generará 1111; esto se interpretará como la posición decimal 15. Estas lecturas intermedias falsas las elimina el código Gray ya que, en cualquier punto de la escala, solamente un bit cambia en un

momento dado. El código Gray puede ampliarse a cualquier número de bit y aún así mantener esta característica y, en forma similar a los números binarios,  $n$  bit son suficientes para definir  $2^n$  posiciones. En la Figura 6.6(c), por ejemplo, se muestra un segmento de un codificador lineal de 6 bit que cuenta de 0 a 63.

### Codificadores incrementales

En la figura 6.7(a) se muestra un codificador incremental que, sin importar la resolución, requiere sólo tres fotoceldas y dos o tres anillos ranurados para realizar una medición de la posición. Su construcción es mucho más sencilla que la de un codificador absoluto, pero se requiere una mayor cantidad de circuitos y programas para interpretar las señales generadas.

El patrón del disco puede verse en la figura 6.7(a). En ocasiones el anillo exterior contiene una sola marca para generar un pulso de sincronización cuando pasa por la fotocelda  $P_1$ , con lo que se indica la posición 0 o de referencia. El movimiento en cualquier dirección a partir de este punto genera un tren de pulsos desde las fotoceldas  $P_2$  y  $P_3$  conforme el patrón de los dos anillos internos pasa sobre ellas. La posición puede determinarse al contar el número de pulsos y al incrementar o decrementar un contador, dependiendo de la dirección del desplazamiento. La dirección se determina a partir de la relación entre las señales  $P_1$  y  $P_2$ , cuyos correspondientes anillos ranurados están desplazados un cuarto de ciclo. El mismo efecto se



**Figura 6.7** Codificador incremental: (a) patrón del disco; (b) distribución de fotoceldas alternadas; (c) señales en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj; (d) señales en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj.

logra mediante la construcción mostrada en la figura 6.7(b) en donde, en lugar de los patrones, son las fotoceldas las que se desplazan una misma distancia.

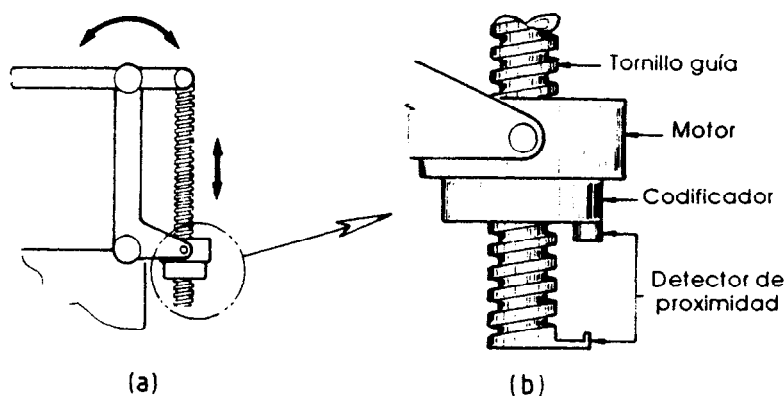
En la figura 6.7(c) se muestran las salidas de cada una de las fotoceldas para una rotación en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj. La señal alternante de P2 está adelante de la señal P3 por un cuarto de ciclo, indicando una rotación en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj. En la figura 6.7(d) se muestra cómo P3 se adelanta a P2 por un cuarto de ciclo, lo cual indica una rotación en la dirección contraria.

### ***Sistemas para medición de la posición***

Ya se ha mencionado la resolución de los dispositivos para medición de la posición y resulta apropiado ahora definir la resolución de un dispositivo y distinguirla de la resolución del sistema para medición de la posición. La resolución de un dispositivo para medir la posición es el movimiento más pequeño que puede detectar. Se cuenta con codificadores de incrementos que generan 2 000 000 de pulsos por revolución, dando una resolución de 0.648 segundos de arco. Un codificador absoluto de alta resolución cuenta, por lo general, con 1 024 segmentos en el disco, con lo que se tiene una resolución de 21.1 minutos de arco. En teoría, los resolvidores, siendo analógicos por naturaleza, tienen una resolución infinitamente fina pero, en la práctica, la resolución está limitada por los circuitos que procesan la señal de cambio de fase. En general, una mayor resolución se logra a un mayor costo.

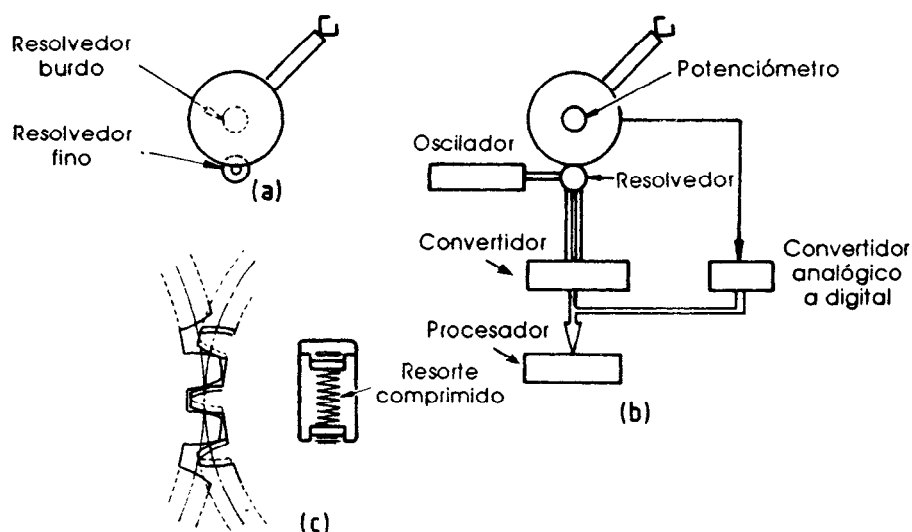
Las posiciones, movimientos o velocidades requeridos en un sistema robot se especifican, durante su funcionamiento automático, por medio de números binarios obtenidos de una memoria digital o calculados por el procesador. Por lo tanto, es muy común hacer referencia a la resolución de  $n$  bit de un sistema para medir la posición de un robot. Por tanto, si la salida del convertidor en el sistema resolvidor de la figura 6.5 es de 14 bit, entonces la resolución de 14 bit es equivalente a  $360/2^{14}$  grados, es decir, 1.32 minutos de arco.

La resolución de un sistema de control está restringida por la resolución del sistema de medición del que depende para su retroalimentación. La selección del sistema de medición y la especificación del sistema de control requieren que el diseñador realice un balance entre el rendimiento y el precio para cada elemento del sistema de control. Estos compromisos resultan, por ejemplo, en gran cantidad de sistemas para medir la posición de un robot que utilizan dispositivos giratorios para medir el movimiento lineal o usan engranes para mejorar la resolución en una situación de actuación directa. En la figura 6.8(a) se muestra el movimiento lineal de un eslabón en un manipulador obtenido por medio de un motor que acciona



**Figura 6.8** Medición de la posición en una transmisión de tornillo de bolas: (a) configuración general; (b) montaje del codificador y del detector de proximidad.

una configuración de tornillo guía. El codificador mide el movimiento del motor y tiene una resolución de 12 bit. Si el paso del tornillo es de 4 mm, la resolución lineal del sistema es  $0.977 \mu\text{m}$ . Sin importar si se utiliza un codificador absoluto o incremental, se aprecia que cuando el sistema se activa inicialmente, la computadora no puede determinar la posición, ya



**Figura 6.9** Sistemas para medición de la posición: (a) transmisión directa para medición gruesa en el resolvedor y reductor para medición fina en el resolvedor; (b) engrane anti-juego; (c) sistema híbrido de potenciómetro y resolvedor con un sistema de reducción de engranes de 1:10.

que el codificador revoluciona más de una vez sobre el desplazamiento total de la articulación. Debe obtenerse una posición inicial conocida moviendo el robot en forma manual, o desplazando cada articulación en forma automática hasta el extremo de su movimiento, indicado por la operación de un interruptor de límite en la forma de un detector de proximidad (figura 6.8(b)).

La velocidad de un robot está con frecuencia limitada por el sistema de medición usado. Supóngase que el codificador mostrado en la figura 6.8(a) es un dispositivo de incrementos de 12 bit, con una velocidad máxima de seguimiento de 500 000/s.

El motor no puede operarse a una velocidad mayor a 122 revoluciones/segundo, la cual es equivalente a una velocidad lineal de 488 mm/s, ya que de lo contrario los pulsos pueden perderse y computarse una medición falsa de la posición.

Si se baja la velocidad para tener mejor resolución, puede conseguirse lo mejor de ambos mundos combinando sistemas de baja resolución y de resolución fina (figura 6.9(a)) en un mismo eje. En este caso, un codificador mide directamente la posición de la articulación mientras que otro dispositivo similar, aumentado 16:1 por medio de engranes, añade cuatro bit a la resolución sin limitar la velocidad de seguimiento. Los sistemas híbridos pueden resultar poco costosos y un ejemplo de ellos se muestra en la figura 6.9(b), en donde se obtiene una resolución de 7.91 segundos de arco al usar un sistema resolvidor de 14 bit (que en un sistema de accionamiento directo podría lograr una resolución de solamente 1.32 minutos de arco). La resolución del sistema a base de un potenciómetro es suficiente para informar al procesador cuál de los resolvidores está activado, calculándose la medición real de la posición a partir de la salida digital del convertidor.

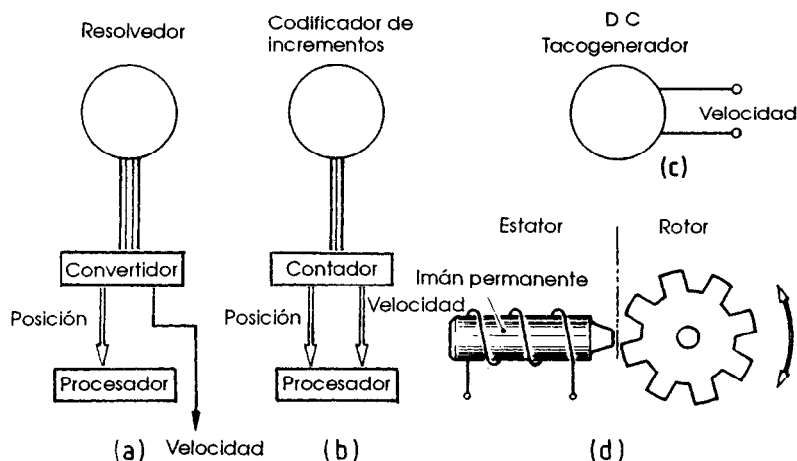
Se dijo antes que un sistema para controlar la posición no puede tener una mejor resolución que la de su sistema de medición. La resolución también está limitada por las deficiencias de los procesos mecánicos y eléctricos de un sistema. Por ejemplo, cuando se utilizan engranes, el juego es una fuente potencial de deterioro y el engrane sin juego es un componente importante en estas circunstancias. En el diagrama, las separaciones que provocan el juego se han exagerado para ilustrar este efecto. Sin importar la dirección de la rotación, los dientes del impulsor se mantienen siempre apoyados del mismo lado de los dientes del engrane impulsado por medio de un segundo engrane impulsado, éste no está fijo sobre el eje, sino que se sujeta al primer engrane impulsado por medio de un resorte. El par del resorte depende de cuánta "cuerda" se da al engrane anti-juego durante el ensamble. Por lo general son suficientes pares reducidos ya que solamente debe eliminarse la fricción en los cojinetes del dispositivo para medir la posición; los resolvidores y codificadores no requieren ninguna fuerza que los impulse a una velocidad constante, con excepción de la fuerza disipada como fricción en los cojinetes.

### 6.3 Medición de la velocidad

Para el control en malla cerrada de la velocidad y para la retroalimentación de información sobre la velocidad en los sistemas para control de la posición se requiere una medición de la velocidad.

En la figura 6.10 se muestran cuatro métodos para medir la velocidad. El sistema en la figura 6.10(a) se presentó antes bajo el encabezado de medición de la posición; este sistema contiene todos los circuitos de procesamiento en un circuito (Large-scale-integrated package, LSI) y, además de una representación digital de la posición, se da una señal de salida CD proporcional a la velocidad. En los sistemas de control continuo en malla cerrada la señal puede usarse, con una amplificación adecuada, para proporcionar retroalimentación sobre la velocidad. En los sistemas de control digital, la señal continua puede procesarse con un convertidor digital analógico o puede calcularse con el procesador a partir de la razón de cambio de la posición o rapidez.

El codificador incremental (figura 6.10(b)) en su forma más usual, envía información a un contador que determina la dirección de desplazamiento a partir de las relaciones de fase de la señales y aumenta o disminuye el conteo de la posición de acuerdo con las relaciones detectadas. La frecuencia de los pulsos es proporcional a la velocidad. Por ejemplo, una frecuencia de pulsos de 2 000 Hz desde un codificador de 1 000 pulsos/revolución indica una velocidad de 2 revoluciones/segundo. El contador puede, por lo tanto, generar representaciones digitales de la dirección y la rapidez que en conjunto constituyen una señal de velocidad. Además como



**Figura 6.10** Medición de la velocidad: (a) potencial CD del resolver al convertidor digital que representa la velocidad; (b) representación digital del codificador; (c) potencial CD del tacogenerador; (d) tacogenerador de reluctancia variable.

en el caso de cualquier sistema de microprocesamiento, la velocidad puede leerse en forma directa de un dispositivo adecuado (la figura 6.10(b) es un ejemplo) o puede calcularse a partir de los cambios de posición.

El término "tacogenerador" se aplica a cualquier dispositivo que genera una salida eléctrica relacionada en una forma definida a la velocidad de una entrada mecánica. El tacogenerador CD (figura 6.10(c)) es tan sólo un generador DC acoplado directamente, o por medio de engranes, a la articulación cuya velocidad se desea medir. El potencial generado es de manera aproximada proporcional a la rapidez; la dirección de la rotación se indica según la polaridad de la salida. La linealidad de un tacogenerador es una medida de qué tan estrechamente su salida sigue la relación de proporcionalidad entre la velocidad y el potencial de salida; existen tacogeneradores de alta calidad con una linealidad de 0.1%.

Las largas líneas del tacogenerador a los circuitos para procesamiento de señales son inevitables en un robot y, en algunos casos, las caídas de potencial resultantes pueden provocar problemas. El tacogenerador CA, al igual que el resolvidor, tiene la ventaja de generar una salida que no se deteriora con las caídas de potencial o con pequeñas cantidades de ruido. Sin embargo, un tacogenerador CA sólo puede generar una sola señal CA y aunque la amplitud de la señal varía con la velocidad, es la frecuencia de la señal lo que se mide, dado que está relacionada en forma lineal con la velocidad de la entrada. Este tipo de tacogenerador, denominado adecuadamente tacogenerador de reluctancia variable (figura 6.10(b)) genera una salida a partir de devanados enrollados alrededor de un imán permanente montado en el estator. El rotor consiste en una rueda dentada de un material ferromagnético, que pasa muy cerca de una extensión vertical de hierro del imán. Conforme la rueda gira, la reluctancia del circuito magnético del imán, la distancia libre y la rueda varían de manera cíclica al pasar cada diente por el imán. De esta forma se induce una fuerza contra electromotriz en los devanados, que tiene una frecuencia  $NR/60$  Hz, en donde  $N$  es el número de dientes de la rueda y  $R$  es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto.

#### 6.4 Medición de la fuerza

Este capítulo se ocupa de la detección de los procesos internos de la máquina, es decir, la medición de las cantidades necesarias para proporcionar la retroalimentación requerida por los servosistemas. La mayoría de los servosistemas de los robots controlan la posición y la velocidad y ya se han considerado los dispositivos que se utilizan para suministrar la retroalimentación de estas cantidades. El control de la fuerza que aplica el efector final es una adición muy útil a las habilidades de un robot; esto se logra con frecuencia midiendo la fuerza y utilizando la información para alterar la posición del efector final del robot, con lo que se permite que la



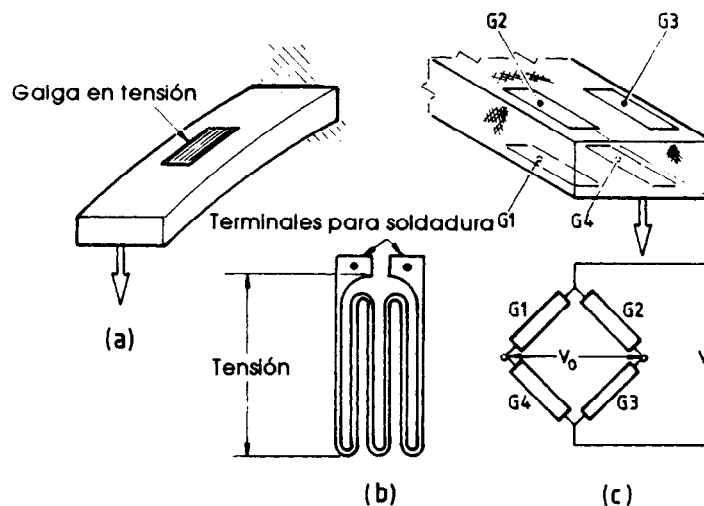
fuerza aplicada alcance el valor deseado. La fuerza puede medirse con un dispositivo externo al robot. También puede medirse con un dispositivo colocado en la muñeca, o sobre los brazos de un manipulador, o midiendo los pares y fuerzas en las articulaciones de la máquina. Sensores de fuerzas interconstruidos de este tipo hacen posible proveer al robot con un control de fuerza; esto permite al usuario solicitar la aplicación de una fuerza por medio de órdenes o comandos de alto nivel en cualquier lenguaje utilizado para enseñar o programar el robot. En esta sección se considera el equipo que se usa para medir las fuerzas e interpretar las señales generadas con el fin de suministrar información sobre las fuerzas aplicadas.

### ***Galgas tensométricas***

La resistencia eléctrica de una galga tensométrica varía de acuerdo con su longitud; la longitud, a su vez varía con la fuerza aplicada. Al fijar la galga al extremo de una viga (figura 6.11(a)), que puede ser el brazo del manipulador o un eslabón en un sensor de fuerza montado en la muñeca del robot, la fuerza o par que actúa sobre la viga puede inferirse a partir del cambio en la resistencia de la galga. El desempeño de la galga tensométrica se cuantifica de acuerdo con el factor de galga  $G$ , que se define como

$$G = \frac{\Delta R/R}{e}$$

en donde  $\Delta R$  es el cambio en la resistencia,  $R$  es la resistencia sin tensión y  $e$  es la tensión.



**Figura 6.11** Medición de la fuerza: (a) galga tensométrica en viga flexible; (b) patrón de doblado para las galgas tensométricas; (c) puente de galgas tensométricas para una medición selectiva.

La aleación cobre/níquel/manganeso más comúnmente utilizada en las galgas tensométricas brinda un factor de galga, en común con la mayoría de los metales, cercano a 2.1. Esta aleación es adecuada para la aplicación dado que sus propiedades eléctricas y mecánicas permanecen inalteradas por los cambios en la temperatura. Una galga útil ofrece una resistencia sin tensión de  $120\Omega$ , la cual requeriría un cable de gran extensión con un reducido diámetro de sección; esto puede lograrse al erosionar en forma de zig-zag una hoja de la aleación que se cementa sobre la superficie por monitorear, generalmente con un adhesivo epóxico (figura 6.11(b)).

También se utilizan materiales semiconductores para las galgas tensométricas; silicio con impurezas P produce un factor de galga normal de 100, mientras que se obtiene un factor de -100 en el silicio con impurezas n (un factor negativo de calibración indica que la resistencia del calibrador disminuye conforme aumenta la tensión). El elevado factor de galga indica que estos materiales son muy sensibles a la tensión, pero también presentan la desventaja de que su resistencia, y el factor de galga mismo, son susceptibles a cambios de temperatura.

Es conveniente que el sistema de medición sea sensible a la flexión de la viga en la dirección de interés, pero que sea insensible a flexiones o torsiones en otras direcciones. Se han diseñado diversas configuraciones de galgas tensométricas que resulten adecuadas en aplicaciones específicas, el puente de cuatro galgas es muy útil (figura 6.11(c)). La salida del puente es

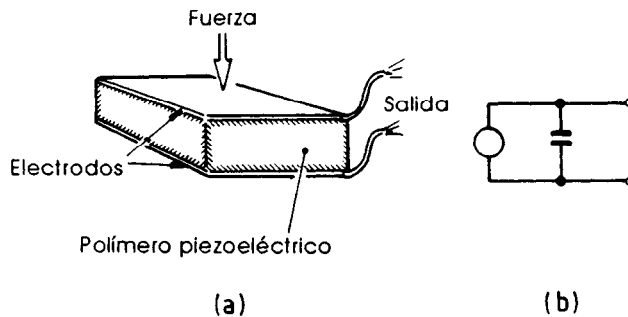
$$V_0 = \left[ \frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_4}{R_1 + R_4} \right] V_i$$

El factor entre corchetes cambia conforme la viga se flexiona en la dirección de interés, pero no se altera si se flexiona en una dirección perpendicular a ella, o si se tuerce.

### ***Polímeros piezoeléctricos***

Las galgas tensométricas han sido desde hace mucho el método tradicional para medir una fuerza; han dado resultados satisfactorios en muchas aplicaciones en robots. Los dispositivos piezoeléctricos, sin embargo, están compitiendo actualmente con las galgas tensométricas.

Un fenómeno muy conocido es que los átomos en una estructura cristalina se desplazan cuando se aplica una fuerza al material; el desplazamiento es proporcional a la fuerza aplicada. Además, un material piezoeléctrico adquiere una carga eléctrica proporcional al desplazamiento y, por lo tanto, proporcional a la fuerza aplicada. Mediante el acoplamiento de electrodos metálicos en caras opuestas de una película de un material



**Figura 6.12** Sensor de fuerza piezoeléctrico: (a) construcción; (b) circuito equivalente.

piezoeléctrico (figura 6.12(a)), se forma un sensor piezoeléctrico de fuerza; los electrodos son necesarios para colectar la carga.

Desde el punto de vista eléctrico, un sensor piezoeléctrico de fuerza es un generador de cargas colocado en paralelo con un capacitor (figura 6.12(b)). La corriente generada es proporcional a la rapidez de cambio de la carga eléctrica, por lo que el sensor piezoeléctrico de fuerza genera una corriente proporcional a la rapidez de cambio de la fuerza aplicada. Para entradas alternadas de fuerza, la corriente alterna de salida se interpreta fácilmente para revelar la amplitud y frecuencia de la entrada; una fuerza estática, sin embargo, ocasiona una salida nula, dado que no existe un gradiente en la entrada. Sin embargo, en la sección 6.5 se verá que es posible integrar la salida para proporcionar información sobre fuerzas estáticas de entrada.

Muchos polímeros sintéticos presentan el efecto piezoeléctrico y estos materiales son, en particular, útiles ya que pueden adoptar formas adecuadas para aplicaciones de sensores en robots. Por ejemplo, su flexibilidad permite que se utilicen en sensores externos de fuerza como la piel artificial (Capítulo 8).

El fluoruro de polivinilideno ( $\text{PVF}_2$ ) es adecuado para aplicaciones en robótica, ya que tiene un fuerte efecto piezoeléctrico y buena resistencia mecánica. Este polímero se encuentra disponible de manera comercial en una gran variedad de formas; Dario y colaboradores (1983) informaron en detalle sobre un método para la fabricación de un material sensor a partir del mismo:

- 1) La película de  $\text{PVF}_2$ , que no es piezoeléctrica en su forma natural, se extiende hasta alcanzar cuatro veces su longitud original. Esto hace que la fase cristalina de la película original se altere a un estado piezoeléctrico.
- 2) Un tratamiento de recocido propicia la estabilidad dimensional.

- 3) Los electrodos se depositan sobre el polímero al vacío. Los materiales que se emplean son aluminio, níquel/cromo y cromo/oro.
- 4) Se aplica un fuerte campo eléctrico al polímero, manteniendo un potencial entre los electrodos; este proceso de "sondeo térmico" estabiliza la estructura molecular del material.

### *Sistemas para medición de fuerzas y pares*

Se ha dicho que una fuerza puede medirse mediante el monitoreo de la tensión en galgas tensométricas o, en forma más directa, por medio de dispositivos piezoeléctricos. Con respecto a la medición de la fuerza interna en los robots, existen dos categorías de sistemas:

- Aquellos diseñados para medir una fuerza o par en una dirección en particular con respecto a la muñeca o las tenazas.
- Un sistema de medición más general, el más completo de los cuales suministra información acerca de las fuerzas y pares sobre los tres ejes ortogonales; es un sensor de fuerza y par con seis grados de libertad.

Considérese el primer tipo de sistema. Por lo general se deben solucionar dos problemas: el sistema deberá tener una sensibilidad adecuada en relación con la fuerza o par de interés, pero además el sistema deberá ser insensible a fuerzas o pares en otras direcciones.

En la figura 6.11(c), por ejemplo, se muestra cómo pueden configurarse las galgas tensométricas para una medición selectiva de la flexión; una configuración simple como ésta puede usarse para medir la flexión de un eslabón del manipulador. Dado que se conoce la forma geométrica del robot al momento de efectuar la medición, es posible calcular el peso de un objeto sostenido por las tenazas. Es necesaria una calibración inicial del sistema para establecer qué proporción de la deflexión se debe al peso de los componentes del manipulador.

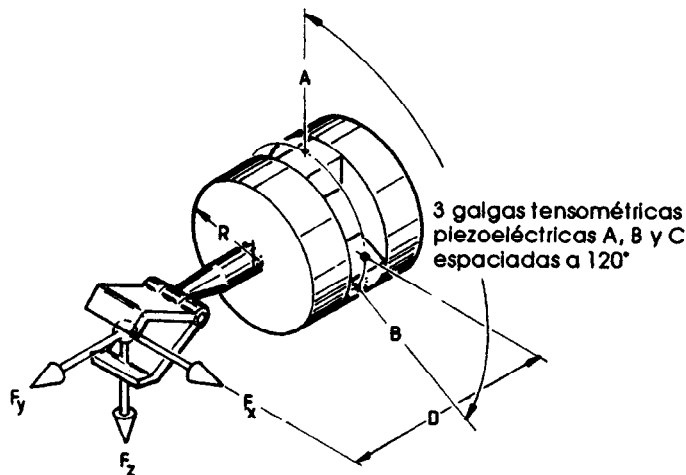
En la figura 6.13 se muestran unas tenazas unidas a la muñeca por medio de tres transductores de fuerza, cada uno de los cuales sólo mide la fuerza a lo largo del eje de la muñeca. Si puede suponerse que no se está aplicando ningún par a las tenazas, lo cual sería cierto si el centro de gravedad de las partes coincidiera siempre con el punto central de la herramienta (TCP), por ejemplo, entonces las tres fuerzas medidas constituyen información suficiente para calcular las fuerzas en el punto central de la herramienta. Los transductores se disponen a intervalos de  $120^\circ$  alrededor de un círculo de radio  $R$ , cuyo plano es una distancia  $D$  a partir del punto central de la herramienta. Si se considera que las fuerzas  $F_a$ ,  $F_b$ ,  $F_c$ , medidas en los transductores, son positivas cuando son fuerzas de

compresión, entonces las fuerzas aplicadas por las tenazas en el punto central de la herramienta se obtienen de

$$\begin{vmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -0.866R/D & 0.866R/D \\ 1 & 1 & 1 \\ R/D & -0.5R/D & -0.5R/D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{vmatrix} \quad (6.2)$$

Es importante recalcar las limitaciones de este tipo de sensor; no sólo no puede medir pares, sino que cualquier momento aplicado a las tenazas se reflejará como fuerzas en los transductores y la ecuación (6.2) no será válida. El valor de este tipo de sistema radica en que es mucho más simple y, por lo tanto, mucho menos costoso que dispositivos más completos. Existen aplicaciones en las que se tiene sólo un punto de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo; en este caso, los pares no pueden transmitirse a la muñeca y resulta suficiente un sistema selectivo.

Pueden obtenerse comercialmente sensores de par en seis ejes y sensores de par ("celdas de carga"). Una unidad común presenta el transductor dentro de un compartimiento sellado, lo cual hace que la unidad resulte adecuada para ambientes industriales; además incluye una microcomputadora que convierte las mediciones en fuerzas y pares sobre tres ejes ortogonales; la información se envía a través de una interfase estándar, por ejemplo, RS 232. La necesidad de medir la fuerza en los robots ha motivado el diseño de sensores diseñados para esta área (Gaillet y Reboulet, 1983). Estos sensores recibirán mayor atención en el capítulo 8.



**Figura 6.13** Sensor de fuerza en tres ejes usando tres galgas tensométricas montados en la muñeca.

### 6.5 Conversión analógica a digital

En el capítulo 4 se mostró que muchos dispositivos de accionamiento se impulsan con señales analógicas, por ejemplo, una señal de corriente directa a una servoválvula electrohidráulica. También se han presentado dispositivos accionados por señales digitales, por ejemplo, los motores de pasos. En el capítulo 5 se examinaron sistemas de control que manejan señales tanto analógicas como digitales y en las primeras secciones de este capítulo se vio que este tipo de señales se presentan en sistemas usados para medir la posición, la velocidad y la fuerza. Por lo tanto, en casi todos los sistemas controlados por una computadora se dan casos en donde es necesario convertir señales de un tipo al otro. Los dispositivos que realizan esta función se denominan convertidores analógicos a digitales (CAD) y convertidores digitales a analógicos (CDA) (Hnatek, 1976).

En esta sección se cubrirán la construcción y el funcionamiento de estos convertidores después de considerar algunos componentes básicos esenciales para su operación. Los convertidores digitales a analógicos se detallan antes que los convertidores analógicos a digitales dado que algunos tipos de convertidores analógicos a digitales utilizan un convertidor digital a analógico interno con fines de retroalimentación.

#### *Amplificador operacional*

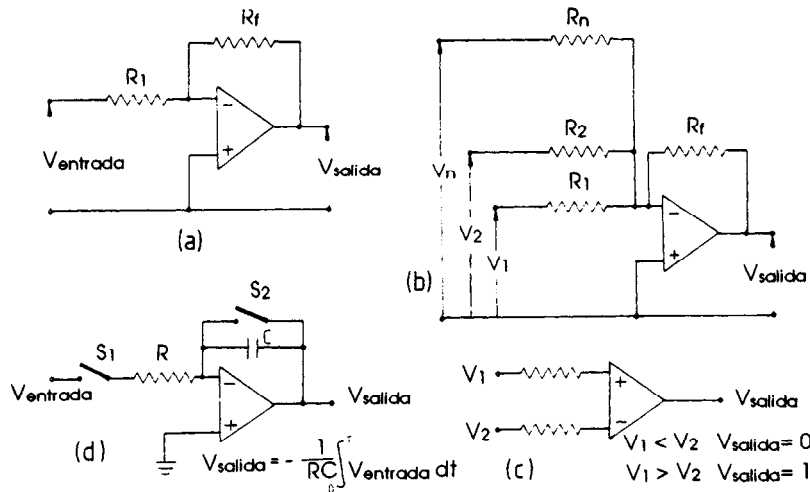
Tanto los convertidores digitales a analógicos como los analógicos a digitales requieren las funciones de amplificación, suma, comparación, integración y generación de rampas. Todas estas funciones pueden obtenerse con un amplificador operacional. El amplificador operacional (op-amp), un amplificador diferencial con una ganancia muy elevada, se utiliza siempre con una retroalimentación negativa (figura 6.14(a)). En esta modalidad actúa como un amplificador con inversión:

$$V_{\text{salida}} = -\frac{R_f}{R} V_{\text{entrada}} \quad (6.3)$$

Una extensión de este circuito forma un amplificador aditivo (figura 6.14(b)), cuya salida es

$$V_{\text{salida}} = -R_f \left\{ \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right\} \quad (6.4)$$

La función de un comparador es comparar dos potenciales e indicar cuál de ellos es mayor. El circuito básico para usar un op-amp como comparador se muestra en la figura 6.14(c).



**Figura 6.14** Circuitos con amplificadores operacionales: (a) amplificador de inversión; (b) sumador; (c) integrador; (d) comparador.

Cuando el potencial conectado a la terminal positiva excede el potencial en la terminal negativa, la salida se eleva a un potencial máximo, que se considera una señal de ENCENDIDO o 1 lógico. Si la relación entre los potenciales se invierte, la salida es una señal de APAGADO, o 0 lógico. El tiempo de respuesta de un comparador op-amp puede no ser siempre satisfactorio, en cuyo caso será necesario utilizar dispositivos más especializados con un tiempo de respuesta más breve.

Cambiando la atención al aspecto de la integración, en la figura 6.14(d) se aprecia que el op-amp requiere un capacitor en la línea de retroalimentación. El dispositivo se restablece mediante la apertura del interruptor  $S_1$  y el cierre del interruptor  $S_2$ . Para llevar a cabo la integración,  $S_2$  se abre y  $S_1$  se cierra. El potencial de salida después del tiempo  $T$  se obtiene de:

$$V_{\text{salida}} = -\frac{1}{RC} \int_0^T V_{\text{entrada}} dt \quad (6.5)$$

Una rampa, o potencial que aumenta en forma estable, se obtiene de la configuración del integrador mediante la aplicación de un potencial estable de referencia conocido  $-V_r$  a la entrada; la ecuación (6.5) se transforma en

$$V_{\text{salida}} = \frac{t}{RC} V_r \quad (6.6)$$

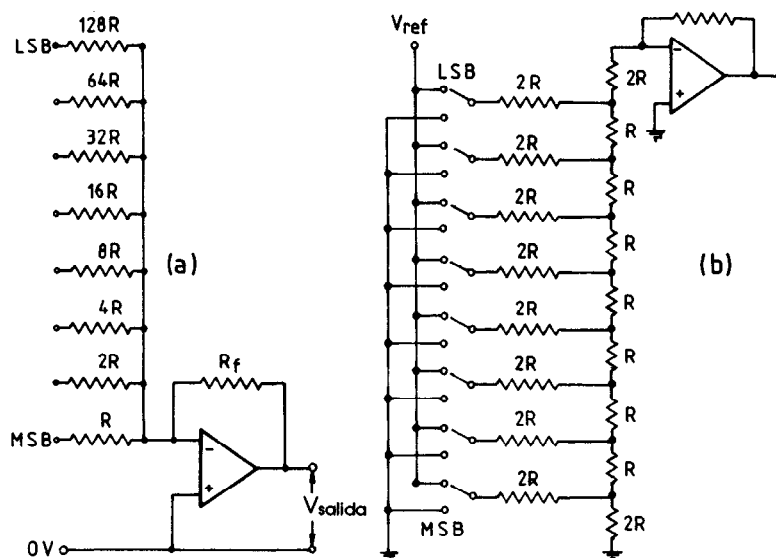
### Convertidores digitales a analógicos

El propósito de un convertidor digital a analógico es convertir una señal digital en un potencial analógico cuyo valor sea proporcional al número binario representado por la entrada. La transmisión de un número digital de, por ejemplo, ocho bit, requiere ocho líneas, cada una de las cuales podrá estar ENCENDIDA o APAGADA, es decir, 5 V o 0 V respectivamente. El amplificador sumador puede usarse directamente como convertidor digital a analógico. La ecuación (6.4) especificó la operación del amplificador de adición y en este caso todos los potenciales de entrada son iguales a  $V$ , por lo tanto,

$$V_{\text{salida}} = -R_f \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_8} \right) V \quad (6.7)$$

Cada bit sucesivo en la palabra digital tiene la mitad del valor analógico del bit anterior, así que ponderando cada bit con una resistencia apropiada, el amplificador aditivo resulta un convertidor digital a analógico válido (figura 6.15(a)).

Si la señal del bit más significativo (MSB), el bit 7, se introduce a través de una resistencia  $R$ , entonces el bit 6 deberá tener una resistencia  $2R$ , el bit 5 una resistencia  $4R$ , y así en forma sucesiva, duplicando la



**Figura 6.15** Convertidor digital a analógico: (a) red sumadora; (b) red de escalera  $R-2R$ .



resistencia cada vez hasta que en el bit 0 la resistencia sea  $128R$ . La salida es ahora en realidad proporcional al valor digital de la entrada:

$$V_{\text{salida}} = -R_f \left( \frac{\text{MSB}}{R} + \frac{\text{BIT6}}{2R} + \dots + \frac{\text{LSB}}{128R} \right) V \quad (6.8)$$

Una limitación de este circuito es que la ponderación correcta de cada bit depende de que las resistencias tengan valores en las proporciones exactas requeridas, un requerimiento que no se satisface con facilidad al usar componentes discretos o circuitos integrados.

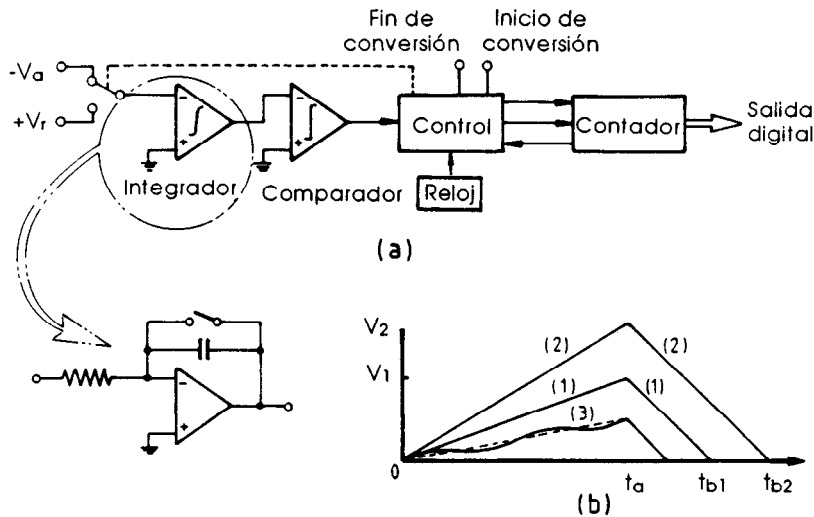
Muchos convertidores digitales a analógicos existentes utilizan esta técnica para vencer la dificultad de obtener una amplia gama de resistores, cuando la precisión de sus resistencias es crítica para la precisión del convertidor. (figura 6.15(b)) se ideó la escalera  $R - 2R$  como una red de entrada adecuada para esta aplicación. Un convertidor de ocho bit requiere 27 resistores idénticos (obteniendo  $2R$  con dos resistores en serie) y esto es más fácil de lograr con precisión con componentes discretos o un chip integrado. La red de escalera divide un potencial de referencia en una serie de potenciales, cada uno de los cuales tiene la mitad del valor del anterior y las señales de bit se usan para conmutar o conectar a tierra una línea de entrada.

### **Convertidores analógicos a digitales**

Se describirán dos tipos de convertidores analógicos a digitales: el de doble rampa y el de aproximación sucesiva, ya que son ejemplos característicos de los dispositivos que se usan para lograr esta conversión.

En el convertidor analógico a digital de doble rampa (figura 6.16(a)) se emplea un integrador para generar una rampa a partir del potencial desconocido durante un periodo fijo de tiempo. La carga a través del integrador se disipa, entonces, mediante la aplicación de una rampa negativa de gradiente conocido, dado que se deriva de un potencial de referencia y se registra el tiempo requerido para llegar a un potencial cero. El procedimiento de la lógica de control, a la recepción del inicio de la conversión (SOC), es:

- 1) Colocar en APAGADO el fin de la conversión (EOC)
- 2) Restablecer el contador a cero
- 3) Conmutar el integrador a  $V_a$  y comenzar la generación de la rampa
- 4) Esperar que la señal del comparador se APAGUE
- 5) Enviar un pulso al contador
- 6) Si la señal de saturación del contador está APAGADA, regresar al paso 5
- 7) Conmutar el integrador a  $-V_r$



**Figura 6.16** Convertidor analógico a digital de doble rampa:  
(a) estructura; (b) rampas comunes.

- 8) Enviar un pulso al contador
- 9) Si la señal del comparador está APAGADA, regresar al paso 8
- 10) Enviar señal de fin de conversión (EOC)

En la figura 6.16(b) se muestra que para una entrada dada el integrador alcanza  $V_1$  en el tiempo  $t_a$ . Como el intervalo del tiempo 0 a  $t_a$  es el tiempo requerido para que el contador se sature desde 0,

$$t_a = 2^n t_c \quad (6.9)$$

para un convertidor de  $n$  bit, en donde  $t_c$  es el intervalo entre los pulsos del reloj.

La ecuación (6.5) da el potencial alcanzado por un integrador, en este caso

$$V_1 = \frac{V_a}{RC} 2^n t_c \quad (6.10)$$

La misma ecuación es aplicable a la rampa de gradiente negativo, pero en este caso la pendiente es diferente dado que se aplica un potencial de entrada diferente:

$$V_1 = \frac{V_r}{RC} N t_c \quad (6.11)$$

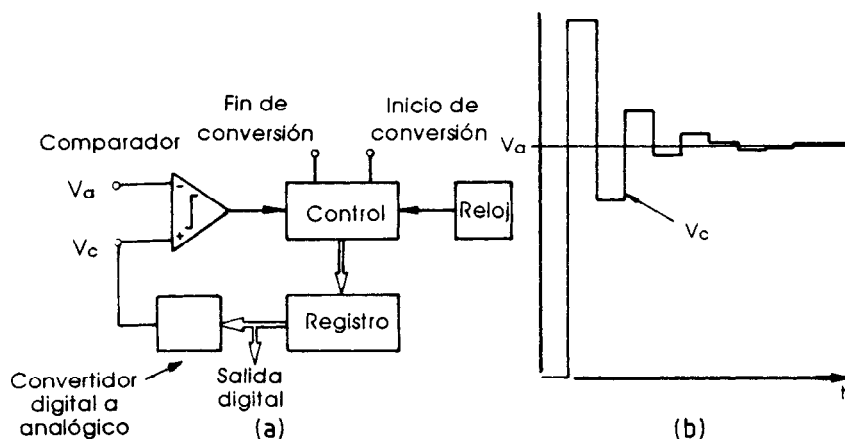
en donde  $N$  es el número de pulsos registrados por el contador. Las ecuaciones (6.10) y (6.11) producen

$$V_a = (V_r/2^n)N \quad (6.12)$$

Aun cuando los conteos registrados durante el tiempo que duran la rampa positiva  $t_a$  y la rampa negativa  $(t_{b1} - t_a)$  dependen del valor de  $t_c$ , esta cantidad no aparece en la ecuación (6.12); la constante de proporcionalidad que relaciona a  $N$  con  $V_a$  no varía con  $t_c$ . También es importante el hecho de que  $RC$  no aparezca en la ecuación. Para lograr una mayor precisión,  $t_c$  y  $RC$  deben ser constantes durante el periodo de conversión, pero sus valores reales no afectan la precisión del convertidor. A esto se debe que el convertidor de doble rampa se use en forma extensa cuando se requiere mayor precisión; se cuenta con una resolución de 20 bit.

El tiempo de conversión de un convertidor analógico a digital de doble rampa depende del valor de la entrada. Al observar la figura 6.16(b) se aprecia que como la segunda rampa tiene siempre la misma pendiente, el tiempo requerido para disipar el potencial  $(t_{b1} - t_a)$  para la curva (1) o  $(t_{b2} - t_a)$  para la curva (2), depende del potencial alcanzado por el integrador, el cual a su vez depende del potencial  $V_a$  en sí. Los tiempos de conversión son similares a los convertidores de una sola rampa.

La operación del convertidor analógico a digital de doble rampa, debido a la integración involucrada, no digitaliza un valor analógico instantáneamente, sino que indica el valor promedio a lo largo del periodo de tiempo en la primera rampa;  $t_a$  en la figura 6.16(b). Por lo tanto, el convertidor no es muy sensible al ruido y si se conoce la frecuencia del posible ruido en una señal, una buena práctica es hacer que  $t_a$  sea un



**Figura 6.17** Convertidor analógico a digital por aproximación sucesiva: (a) estructura; (b) con un potencial de entrada de 1.645, el convertidor ajusta el registro en 1.66 V.

múltiplo del tiempo del ciclo; de este modo se descarta efectivamente la componente alterna de  $V_a$ . (Véase la curva 3) en la figura 6.16(b)).

Cuando se requieren mayores velocidades de conversión puede emplearse el convertidor analógico a digital por aproximaciones sucesivas. En la figura 6.17(a) se muestra que su estructura es similar a la del tipo de contador de rampa, pero la lógica de control es diferente. En cada etapa sucesiva el convertidor determina si  $V_a$  se encuentra en la mitad superior o inferior de una banda seleccionada de niveles de cuantización comparándolo con un  $V_c$  apropiado. La mitad seleccionada se segmenta de nuevo en dos partes iguales de manera que un convertidor analógico a digital de aproximación sucesiva de  $n$  bit alcance el fin de conversión en  $n$  periodos de reloj. El procedimiento en el inicio de conversión es:

- 1) Colocar el bit más significativo (MSB) en el registro en 0 y todos los otros bit en 1
- 2) Si la señal del comparador es APAGADO, cambiar el bit más significativo a 1
- 3) Repetir los pasos 1) y 2) para cada uno de los bit en orden descendente
- 4) Cuando el bit menos significativo se haya ajustado, generar la señal de fin de la conversión (EOC)

Un ejemplo servirá para ilustrar cómo este proceso fuerza el contenido del registro al valor  $V_a$ . Un convertidor de ocho bit, con una entrada máxima de 5.1 V y un intervalo de cuantización de 0.02 V, recibe una entrada  $V_a = 1.645$  V. La primera etapa ajusta el registro en

$$0111\ 1111_2 = 127_{10} \text{ lo que da } V_c = 2.54\text{ V}$$

La salida del comparador es ENCENDIDO dado que  $V_c > V_a$ , por lo que el bit más significativo (MSB) permanece en 0. Al ajustar el bit 6 a 0 produce el siguiente contenido en el registro

$$0011\ 1111_2 = 63 \text{ lo que da } V_c = 1.26\text{ V}$$

El comparador pasa a APAGADO dado que  $V_c < V_a$ , por lo que el bit 6 se cambia a 1. El proceso completo, que se ilustra en la figura 6.17(b), es como se muestra en la Tabla 6.2.

Este ejemplo también ilustra el hecho de que un convertidor analógico a digital por aproximación sucesiva no necesariamente alcanza el valor más cercano a la entrada. Por ejemplo, en este caso la lectura más cercana posible a 1.645 V sería 1.64 V, pero la decisión del convertidor es 83 en el registro, lo cual corresponde a  $V_c = 1.66$  V. Sin embargo, el valor digitalizado está siempre dentro de 1 bit menos significativo (un intervalo de cuantización) de  $V_a$ .

El tiempo de conversión en este dispositivo está relacionado con su resolución y no depende del valor de  $V_a$ . Son posibles tiempos de conversión de  $1 \mu s$  y resoluciones de 14 bit.

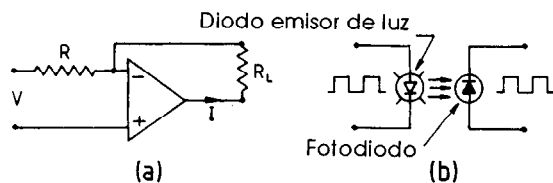
Tabla 6.2

Paso	Registro $V_c$		$V$	Comparador	Decisión
	Binario	Decimal			
1	0111 1111	127	2.54	ENCENDIDO	MSB = 0
2	0011 1111	63	1.26	APAGADO	BIT 6 = 1
3	0101 1111	95	1.90	ENCENDIDO	BIT 5 = 0
4	0100 1111	79	1.58	APAGADO	BIT 4 = 1
5	0101 0111	87	1.74	ENCENDIDO	BIT 3 = 0
6	0101 0011	83	1.66	ENCENDIDO	BIT 2 = 0
7	0101 0001	81	1.62	APAGADO	BIT 1 = 1
8	0101 0010	82	1.64	APAGADO	BIT 0 = 1
	0101 0011	83			

### Comparación entre convertidores analógico a digital

La selección de un convertidor analógico a digital obedece a un balance del costo contra la velocidad de conversión y la resolución requeridas para una aplicación en particular. Las posibilidades pueden compararse enumerándolas en orden de costo creciente:

- Rampa de contador: el tiempo normal de conversión es de 1 ms (variable); requiere una entrada estable.
- Seguimiento: salida disponible continuamente; se requiere tiempo de conversión para grandes cambios en la entrada.
- Rampa única: el tiempo normal de conversión es de 1 ms (variable); resolución de hasta 12 bit; sujeto a variaciones en la temperatura.
- Rampa doble: el tiempo normal de conversión es de 1 ms (variable); resolución de hasta 20 bit; promedia la entrada.
- Aproximación sucesiva: el tiempo normal de conversión es de  $1 \mu s$  (constante); resolución de hasta 14 bit.



**Figura 6.18** Interfases: (a) conversión de potencial a corriente; (b) aislamiento óptico.

### 6.6 Otros problemas de interfase

La comunicación entre los elementos de un sistema de control para un robot requiere procesos de conversión para lograr que las señales del dispositivo transmisor sean compatibles con el receptor. Se ha visto como se logra la conversión entre señales analógicas y digitales. En esta sección se consideran dos aspectos adicionales de la interfase: conversión de potencial a corriente y aislamiento.

#### *Conversión de potencial a corriente*

Aun cuando las señales de potencial se encuentran por lo común en los sistemas de control, no resultan adecuadas si se requiere una transmisión a grandes distancias. Bajo estas circunstancias, la resistencia del cable mismo puede ser lo suficientemente importante para introducir una caída de potencial en el circuito. Las señales de corriente no presentan esta desventaja.

Por lo tanto, se prefieren por ejemplo, cuando una servoválvula electrohidráulica montada en un manipulador se está controlando a través de una línea muy larga desde un gabinete de control. En la figura 6.18(a) se muestra cómo se puede usar un amplificador operacional para convertir un potencial en una corriente. Si se supone que la ganancia del amplificador es elevada, y la impedancia de la carga  $R_L$  es baja, el circuito obedece la fórmula  $I = V/R$  con un cierto grado de aproximación.

#### *Aislamiento óptico*

Los optoaisladores se usan para proteger un circuito contra posibles picos de potencial en la entrada. Un aislador característico (figura 6.18(b)) consiste de un diodo emisor de luz (light-emitting diode, LED) y un fotodiodo. El diodo emisor de luz emite pulsos de luz en respuesta a pulsos en el potencial de entrada y, a su vez, estos pulsos de luz estimulan el fotodiodo para emitir pulsos de potencial al circuito receptor. Así, cual-

quier circuito de control de un robot que recibe señales de un dispositivo externo puede protegerse contra la conexión accidental de potenciales dañinos, colocando un optoaislador en la línea de entrada.

### **6.7 Resumen**

El control en malla cerrada requiere la medición del parámetro controlado para obtener una señal de retroalimentación; se ha descrito una gran variedad de técnicas analógicas y digitales para medir la posición, la velocidad y la fuerza. Los dispositivos como el resolovedor, cuya salida no es afectada de manera adversa por la distancia entre el transductor y los circuitos asociados, son de particular importancia para los robots. Con frecuencia se requieren convertidores analógico a digital y digital a analógico para los sistemas controlados por medio de una computadora y se han descrito varios ejemplos. También se han considerado la conversión de potencial a corriente y el aislamiento óptico.





# Capítulo 7

## *Control por computadora*

---

### 7.1 Introducción

La invención de la computadora ha sido un elemento clave en la evolución del robot industrial moderno. Algunas de las funciones realizadas por el control computarizado de un robot pueden llevarse a cabo con otros dispositivos especializados, por ejemplo, el circuito neumático en cascada ilustrado en el capítulo 5 para instrumentar una secuencia basada en la ocurrencia de eventos, pero la flexibilidad global requerida de un robot encierra funciones que sólo puede realizar una computadora. Algunas de estas funciones se enumeran a continuación:

- Se requiere un control de la posición, la velocidad y, posiblemente, la aceleración y la fuerza del efector final.
- Con frecuencia es necesario un control de la trayectoria que recorre el efector final.
- Una secuencia de operaciones debe llevarse a cabo de manera automática; esto comprende con frecuencia la interacción con otros equipos.
- Deben tomarse decisiones de manera que las operaciones puedan llevarse a cabo en forma condicional dependiendo de la información de los sensores.
- Se requieren equipos para que un operador enseñe al robot y posteriormente modifique o agregue instrucciones.
- Debe existir algún medio para memorizar la tarea.

Una microcomputadora, que es un sistema con un solo microprocesador, no puede llevar a cabo todas estas actividades. Para controlar un

robot, la computadora debe contener suficientes procesadores para controlar aquellas funciones no realizadas por dispositivos especializados. En este capítulo se considera cómo maneja la computadora el control automático de la secuencia, la posición y la velocidad, métodos de enseñanza, *software* (el conjunto de instrucciones que ejecutan las tareas) y el *hardware* (la construcción de los componentes que constituyen la computadora).

### **Control de la trayectoria**

Se utilizan distintas estrategias para controlar la trayectoria seguida por el efector final durante el movimiento de un punto en un programa al siguiente. Estas estrategias son importantes durante la operación automática y también durante la enseñanza.

El control punto a punto (Point-to-point, PTP) requiere que se almacenen sólo las coordenadas de los puntos inicial y de destino.

El control de la velocidad de los actuadores (sección 7.2) ayuda a suavizar la trayectoria tomada por el efector final durante un control punto a punto, pero la trayectoria real no puede predecirse con facilidad.

Se requiere un control de trayectoria continua (Continuous Path, CP) cuando la ruta recorrida por el efector final es importante para la tarea. La trayectoria puede definirse en un programa generado fuera de línea o puede enseñarse directamente al robot.

Mediante el uso de la interpolación el control punto a punto también puede mover un efector final a lo largo de una trayectoria controlada; los movimientos incrementales requeridos se calculan a partir de las coordenadas de las posiciones inicial y final y alguna otra información, como la velocidad, que se introduce al inicio de la etapa de enseñanza o programación.

El control de trayectoria continua de, por ejemplo, un robot para una operación de pintura, reproduce la trayectoria trazada por la pistola rociadora durante la etapa de enseñanza, cuando la pistola se dirige en forma manual a través de la operación de pintado.

### **Modos de operación**

Una computadora para el control de un robot puede funcionar en cualesquiera de los modos siguientes: apagado, premanual, manual, enseñanza y automático. Debe hacerse notar que los nombres asignados a estos modos pueden variar de máquina a máquina.

En un modo *apagado* la computadora está inactiva, pero los datos almacenados en la memoria se preservan si se incluye un suministro de energía de respaldo, como puede ser una batería. En el modo *premanual* la computadora está funcionando, pero no es necesario suministrar energía al manipulador ya que sólo se lleva a cabo una transferencia de datos.

El modo manual se selecciona cuando se requiere un control manual directo de los ejes individuales para las funciones de preparación y mantenimiento.

Como su nombre lo indica el modo de *enseñanza* se utiliza para enseñar a la computadora ciertas secuencias de movimientos y otras operaciones que se han de llevar a cabo, en última instancia, en el modo automático. *Enseñanza* es un título generalizado para los métodos de introducción de instrucciones a la computadora de control utilizando el robot. Durante la enseñanza, el robot no está disponible para una operación automática. Los programas para un robot pueden compilarse utilizando una computadora independiente; esto se conoce como programación fuera de línea. Sin embargo, la programación en línea forma parte de la función de enseñanza, dado que la computadora debe sacarse de la operación automática y puesta en un modo de enseñanza que acepte información; la información se suministra por lo general desde un teclado.

## 7.2 Operación automática

La ejecución de tareas en el modo *automático* tiene que ver con una jerarquía de funciones. La más simple, por ejemplo, podría ser una sola secuencia de movimientos basada en tiempos, que se lleva a cabo en forma continua y en la que se transmiten las coordenadas de los puntos que forman parte de la secuencia a sistemas de control dedicados para cada articulación. En términos más reales, una tarea industrial requiere distintas acciones, condicionadas a la información detectada por los sensores y, cuando son muchos los sensores involucrados, se requiere un sistema estructurado para monitorear la información y poner en práctica la acción apropiada.

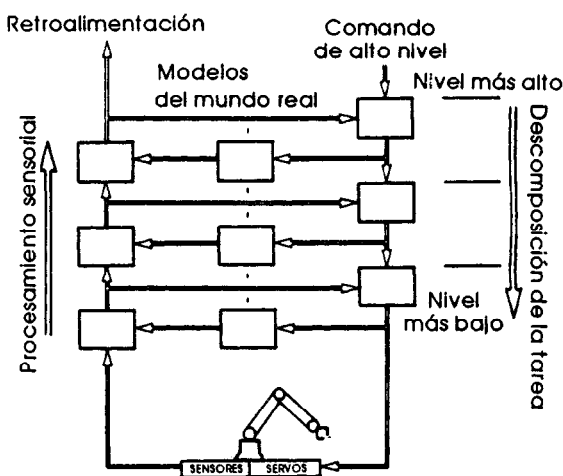
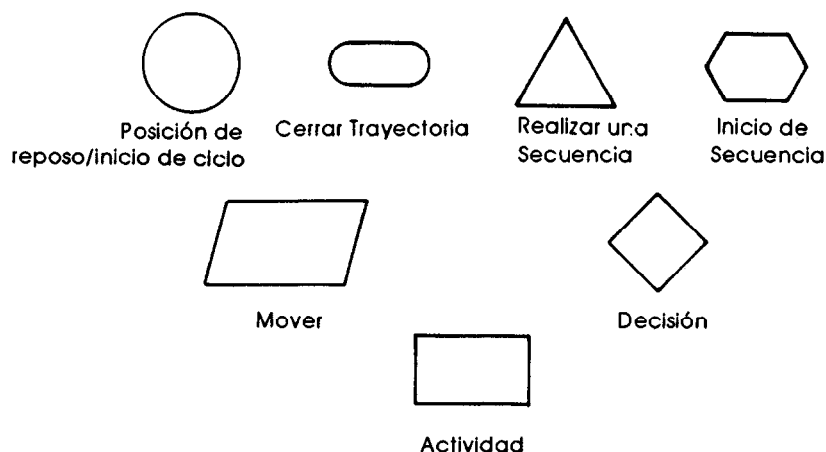


Figura 7.1 Sistema de control jerárquico para un robot.

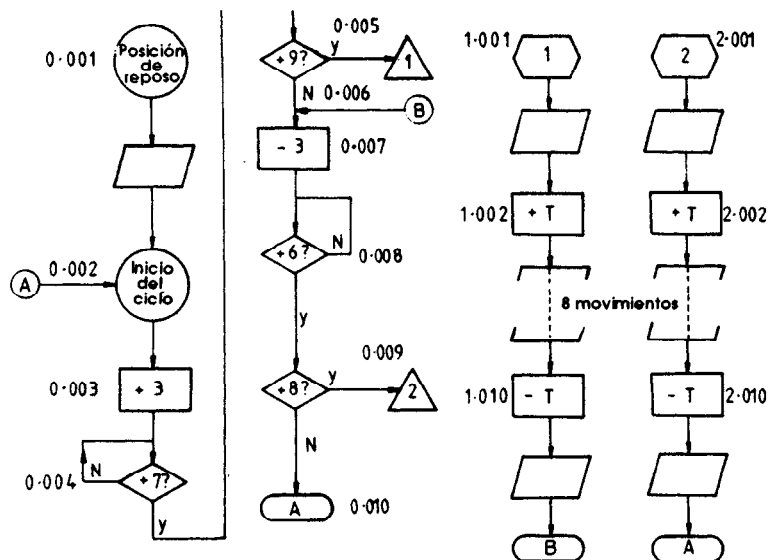


**Figura 7.2** Símbolos para diagramas de flujo para el programa de un robot.

La estructura jerárquica de un sistema como el descrito se ejemplifica con el sistema para control de robots creado por la *U.S. National Bureau of Standards* (Oficina Nacional de Estándares de Estados Unidos) (Albus y colaboradores, 1983; Haynes y colaboradores, 1984). Su sistema de control se divide en una jerarquía de niveles (figura 7.1); cada nivel consiste de tres módulos interconectados: procesamiento de señales detectadas, modelo del mundo real y descomposición de la tarea. El sistema acepta órdenes o comandos de alto nivel en la forma de instrucciones simples que definen tareas complejas, por ejemplo, ensamblar 10 motores tipo B. Estos comandos se desglosan entonces en una secuencia de comandos de bajo nivel, cada uno de los cuales se descompone consecutivamente hasta llegar al nivel más bajo de la jerarquía. Este nivel genera comandos elementales para su transmisión directa al robot, como pueden ser los puntos de referencia requeridos por los controladores de máquina del robot. Las acciones y las decisiones en una tarea compleja con frecuencia dependen de los datos detectados, por lo que esta información necesita procesarse hacia los niveles superiores de la jerarquía.

### **Control de la secuencia**

El funcionamiento automático de un robot requiere el control de la secuencia de los eventos; la puesta en práctica de este tipo de control para dispositivos de levantamiento y colocación por medio de controladores lógicos programables se cubrió en el capítulo 5. Los requisitos de control de un robot son más completos ya que además requieren, por ejemplo, un control programable de la posición y la velocidad; por lo general se requiere una computadora con más de un procesador para satisfacer todas



**Figura 7.3** Diagrama de flujo para el programa de soldadura de un robot en el que se incluye la operación de la mesa giratoria.

las funciones. Los elementos de las secuencias que constituyen un programa para un robot pueden ilustrarse con mayor claridad usando los símbolos de diagrama de flujo con los que está familiarizado el programador de computadoras (figura 7.2). Aunque el lenguaje que se usa para simbolizar las funciones de un robot varía de modelo a modelo, el concepto del diagrama de flujo es universal.

Considérese la configuración de un robot y una mesa giratoria que se muestra en la figura 1.9; se requiere que el robot realice una operación de soldadura en una pieza colocada en el portapiezas, mientras el operador desmonta la parte ya terminada y coloca una nueva pieza de trabajo en la máquina. Dos aspectos de la operación requieren que el robot tome decisiones: cuando se indica a la mesa que debe girar, el robot debe esperar hasta que se haya completado la rotación de 180° (según lo indica un interruptor conectado a una entrada del robot); el robot debe rechazar cualquier parte que se haya colocado en forma incorrecta (situación indicada también por un interruptor estratégicamente instalado).

En la figura 7.3 se muestra un diagrama de flujo del programa necesario. La secuencia de la línea principal (0) comienza en la parte superior izquierda y el punto 0.002 es el inicio del ciclo de la operación. En 0.003 se enciende la entrada 3 (+3), la cual activa un solenoide neumático que hace girar la mesa. La entrada 7 se activa con un microinterruptor cuando la mesa ha dado la vuelta por completo, por lo que el robot constantemente interroga a la entrada hasta que esta condición se ve satis-

fecha. La entrada 9 está conectada a un interruptor que se cierra sólo si la parte se coloca de manera correcta en el portapiezas del lado de la mesa que se presenta al robot; si la colocación es la correcta se lleva a cabo la secuencia 1. En la secuencia 1 el robot se acerca a la parte, enciende el portaelectrodos (+T) y ejecuta las tareas requeridas; con esto, la secuencia se lleva hasta el punto 1.010 en donde el portaelectrodos se apaga (-T), el robot se retira alejándose de la mesa y regresa al punto B, es decir, al punto 0.006. En caso de que la parte se hubiera colocado en forma incorrecta, la secuencia de la línea principal habría pasado de manera directa a 0.006 sin realizar la operación de soldadura. El resto de la secuencia es una repetición de la tarea de soldadura en el otro lado de la mesa, después de la cual el programa regresa al inicio del ciclo, es decir, 0.002.

Este sencillo ejemplo sirve para resaltar algunas de las características de un programa para un robot. Una secuencia de línea principal es un ciclo de instrucciones que determina el orden de las operaciones e incluye enunciados condicionales para llevar a cabo acciones correctivas en donde éstas sean necesarias. En un programa bien estructurado las tareas físicas están contenidas en subsecuencias, lo cual hace más fácil seguir el orden de las operaciones y, por lo tanto, hace que sea más fácil modificarlo.

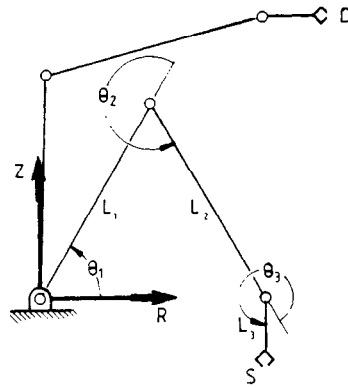
### **Control punto a punto**

En los capítulos anteriores se ha mostrado cómo las coordenadas reales pueden transformarse en coordenadas de máquina para un manipulador dado y cómo un sistema de control continuo o digital para cada articulación puede producir las posiciones deseadas en coordenadas reales. En esta sección se presentarán ciertos métodos para determinar los puntos de referencia para estos controladores.

Cuando la trayectoria real entre las posiciones deseadas no tiene mayor importancia, se utiliza un control punto a punto; cuando la trayectoria es importante, se hace necesario un control de trayectoria continua o un control punto a punto con interpolación.

Existen cuatro tipos de control punto a punto: secuencial, no coordinado, coordinado en los puntos terminales y punto a punto con interpolación. El método de enseñanza es común a todos los tipos. Sólo los puntos inicial y final se almacenan en la memoria y se ignora la trayectoria recorrida por el punto central de la herramienta (*Tool Centre Point*, TCP) durante la enseñanza. La trayectoria real seguida durante la repetición depende del tipo de control que está en operación.

En el control secuencial cada eje se impulsa por turnos. Esta forma de control se encuentra comúnmente en robots animados por motores de pasos y controlados por una sola microcomputadora. La unidad del microprocesador (*Microprocessor Unit*, MPU) misma se usa para generar los pulsos que accionan el motor de pasos, de manera que en un momento dado sólo es posible mover un eje durante la enseñanza y la repetición. Por lo



**Figura 7.4** Control punto a punto de un manipulador de brazo articulado: definición de las coordenadas de máquina.

tanto, al moverse de un punto a otro la computadora mueve el primer eje hacia su destino de acuerdo con la secuencia, repite el proceso para el segundo eje y continúa con este proceso hasta que todos los ejes han alcanzado sus nuevas posiciones. La simplicidad de esta forma de control se paga con el tiempo largo que se requiere para terminar un movimiento completo.

El control punto a punto no coordinado hace más rápido el movimiento al impulsar de manera simultánea todos los ejes. Se requiere un control de posición para cada uno de los ejes, pero no se tiene control de la velocidad de los actuadores, de manera que los actuadores pueden llegar a sus destinos en momentos distintos y, por lo tanto, la trayectoria trazada por el centro de la herramienta no es fácil de predecir. La velocidad global con frecuencia la determina el actuador más lento.

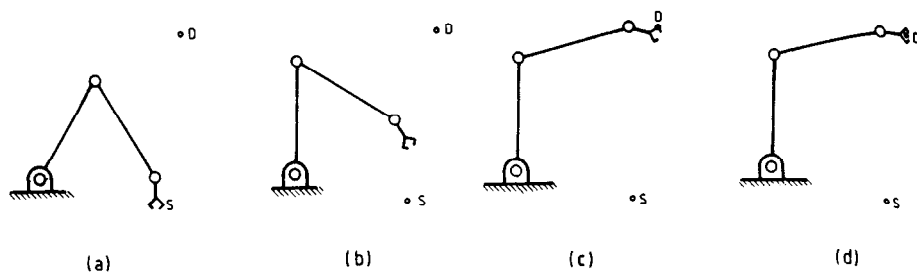
El control punto a punto coordinado en los puntos terminales es utilizado ampliamente. Los ejes se mueven a velocidades controladas, ya que se cuenta con un control de la velocidad; de esta manera, todos los ejes llegan a sus destinos en forma simultánea.

El control punto a punto se usa cuando la trayectoria entre las posiciones deseadas del centro de la herramienta no es de gran importancia. Sin embargo, resulta instructivo hacer notar cómo varían las trayectorias para distintas formas de control punto a punto. Considérese un robot de brazos articulados con cuatro grados de libertad que mueve el punto central de la herramienta desde las coordenadas de máquina iniciales de

$$(\phi_S, \theta_{1S}, \theta_{2S}, \theta_{3S}) = (45^\circ, 60^\circ, 240^\circ, 330^\circ), \text{ es decir, inclinación} = 270^\circ$$

al destino

$$(\phi_D, \theta_{1D}, \theta_{2D}, \theta_{3D}) = (45^\circ, 88.173^\circ, 286.335^\circ, 345.492^\circ), \\ \text{es decir, inclinación} = 0^\circ$$



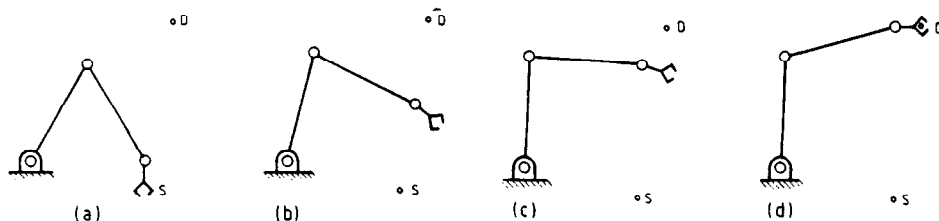
**Figura 7.5** Control punto a punto secuencial: (a) inicio; (b) terminación del movimiento del hombro; (c) terminación del movimiento del codo; (d) terminación del movimiento de inclinación vertical en el destino.

Ambos puntos se han seleccionado en el mismo plano radial vertical, lo que permite que todo el movimiento sea fácil de representar en la página bidimensional. En la figura 7.4 se muestran las configuraciones inicial (S) y de destino (D) en el plano radial. El ángulo de paso inclinación de las tenazas  $\xi$  se define en la figura 2.16.

Las dimensiones del manipulador son  $L_1 = L_2 = 1$  m y  $L_3 = 0.25$  m, y las rotaciones requeridas son por lo tanto:

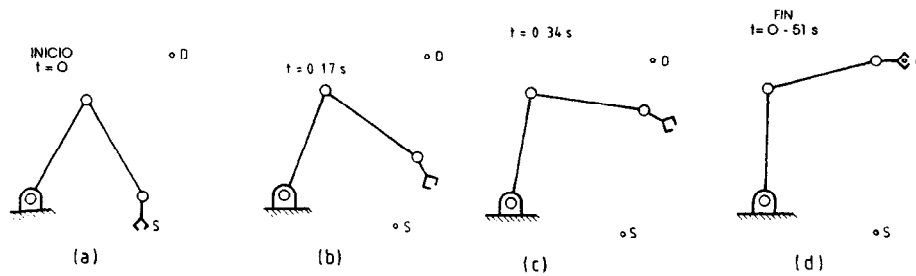
base	$0^\circ$
hombro	$+28.173^\circ$
codo	$+46.335^\circ$
muñeca	$+15.492^\circ$

El control secuencial se ilustra en la figura 7.5; en la figura 7.5(a) se muestra la posición inicial, en la figura 7.5(b) se muestra la posición a la terminación de la rotación del hombro y en la figura 7.5(c) la posición después de la rotación del codo. Por último, la muñeca se gira, con lo que se alcanza el destino mostrado en la figura 7.5(d). Si cada uno de los



**Figura 7.6** Control punto a punto no coordinado: (a) inicio; (b) terminación del movimiento de inclinación vertical del paso; (c) terminación del movimiento del hombro; (d) terminación del movimiento del codo en el destino.





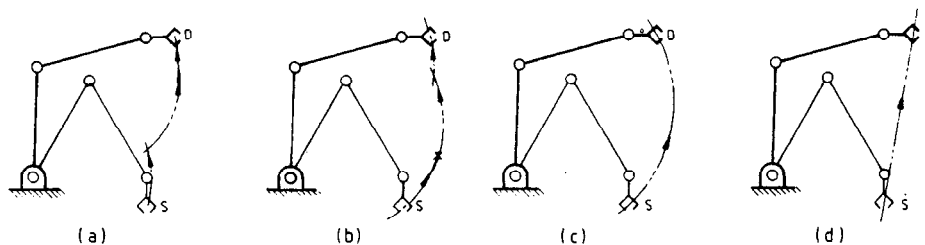
**Figura 7.7** Control punto a punto coordinado: (a) inicio; (b) posición después de 0.17 s; (c) posición después de 0.34 s; (d) destino.

actuadores tiene una velocidad máxima de 1.57 radianes/segundo, el movimiento completo requerirá 1 segundo.

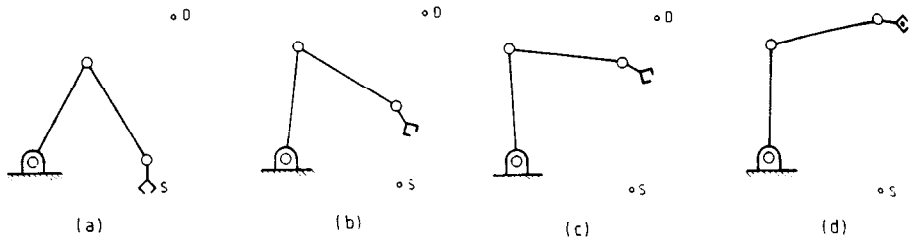
El control punto a punto no coordinado de los mismos actuadores se muestra en la figura 7.6. La posición inicial se muestra en la figura 7.6(a). Si se supone que las velocidades de los actuadores son iguales, en la figura 7.6(b) se muestra la configuración cuando cada actuador ha girado  $15.492^\circ$ , en este caso se habrá completado el movimiento de la muñeca. El hombro debe girar  $12.681^\circ$  adicionales, y las configuraciones resultantes se muestran en la figura 7.6(c). El destino final (figura 7.6(d)) se alcanza cuando el codo ha girado  $46.335^\circ$ . Si todos los actuadores se mueven con la misma velocidad, el tiempo requerido para completar el movimiento se determina según el eje que requiere la mayor rotación; en este caso el codo.

Con los actuadores moviéndose a 1.57 radianes/segundo, el control punto a punto no coordinado completará este movimiento en 0.51 segundos.

El control punto a punto coordinado en los puntos terminales realiza el movimiento en el mismo tiempo que la forma no coordinada, pero todos los actuadores se mueven a una velocidad calculada para completar sus rotaciones al mismo tiempo. En este ejemplo, esto requeriría que el codo se moviera a la máxima velocidad, dado que presenta la mayor rotación;



**Figura 7.8** Comparación de las rutas trazadas por el punto central de la herramienta bajo un control punto a punto: (a) secuencial; (b) no coordinado; (c) coordinado; (d) con interpolación lineal.



**Figura 7.9** Control punto a punto con interpolación lineal, velocidad programada de 2 m/s: (a) inicio; (b) posición después de 0.253 s; (c) posición después de 0.507 s; (d) destino alcanzado después de 0.76 s.

la velocidad de los otros actuadores se calcularía de manera que cada uno completara su rotación en el mismo tiempo que el codo. Las velocidades de rotación requeridas son:

base	0 rad/segundo
hombro	0.96 rad/segundo
codo	1.57 rad/segundo
muñeca	0.53 rad/segundo

Las posiciones después de 0.17 segundos, después de 0.34 segundos y en el destino (0.51 segundos) se muestran en la figura 7.7.

Las trayectorias del punto central de la herramienta para las distintas formas de control se ilustran en la figura 7.8. Los resultados del control secuencial se muestran en la figura 7.8(a), del control no coordinado en la figura 7.8(b) y del control coordinado en el punto terminal en la figura 7.8(c).

Se puede ver que, de las tres formas de control, el control coordinado en el punto terminal es el único que no presenta discontinuidades en la trayectoria del centro de la herramienta.

Una vez comparados los controles punto a punto secuencial, no coordinado y coordinado en el punto terminal, se ha de considerar el control punto a punto con interpolación. Debe resultar claro que ninguna de las formas de control punto a punto mencionadas hasta ahora puede controlar la trayectoria del punto central de la herramienta. Si se requiere este tipo de control, la computadora debe calcular las coordenadas de las posiciones intermedias sobre la trayectoria deseada, es decir, debe interpolar. Si las posiciones interpoladas están lo suficientemente juntas unas de otras, la ruta que tome el efector final se acercará a la ruta deseada. El movimiento en línea recta se logra por medio de una interpolación lineal, mientras que la interpolación circular se utiliza cuando una aplicación requiere que el efector final describa un movimiento circular.

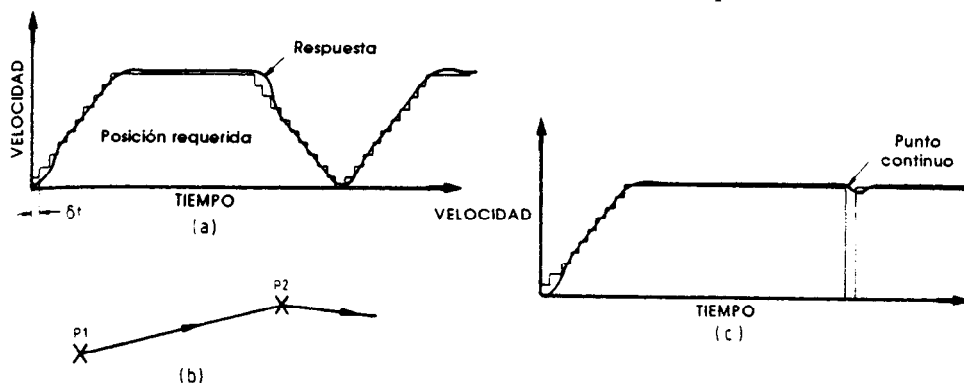
El efecto de un control punto a punto con una interpolación lineal en el ejemplo anterior se muestra en la figura 7.8(d). En la figura 7.9 se muestra la configuración del manipulador al inicio de su desplazamiento, después de que se ha completado un tercio del movimiento, después de completados dos tercios del movimiento y en el destino final.

El intervalo de tiempo entre las etapas lo determinan la velocidad del procesador y el número de cálculos que deben llevarse a cabo en cada etapa. Un robot *Cincinnati Milacron T3*, por ejemplo, utiliza procesadores AM2091B con un tiempo característico para ejecución de las instrucciones de 125 ns (Money, 1982). El T3 es una máquina con seis grados de libertad y las 1677 multiplicaciones y 1330 sumas necesarias se realizan en un intervalo de tiempo de 5 ms (Megahed y Renaud, 1982).

El control punto a punto requiere que la computadora almacene información de las coordenadas para cada punto en un programa y que las instrucciones se lleven a cabo en esos puntos. Esta información se almacena en la memoria; el tamaño de la memoria de un control de robot computarizado se expresa por lo general en términos del número de puntos que pueden mantenerse en ella. Un tamaño normal de memoria es 1 024 puntos.

### Rampas de aceleración y desaceleración

Un manipulador práctico tiene cierto grado de flexibilidad debido a la flexión de los brazos y la falta de rigidez en las articulaciones, sean éstas impulsadas hidráulica o eléctricamente. Por lo tanto, cualquier intento de iniciar o detener en forma abrupta cargas de gran tamaño puede resultar en vibraciones de la carga y del manipulador. Estas vibraciones pueden reducirse mediante una aceleración a la velocidad requerida con un ritmo



**Figura 7.10** Rampas de aceleración y desaceleración: (a) puntos de referencia y respuesta; (b) P2 puede no tener rampas si el cambio en dirección es pequeño; (c) respuesta a través de un punto continuo.

controlado (*rampa de aceleración*, por lo general de  $4 \text{ m/s}^2$ ) y una desaceleración en forma similar al aproximarse al destino.

En la figura 7.10(a) se muestra cómo se pondría en práctica esta estrategia en una máquina que utilizara un control punto a punto con interpolación lineal. El requisito es comenzar desde el reposo en el punto  $P1$ , moverse al punto  $P2$ , y de ahí a otro punto (figura 7.10(b)). En lugar de exigir la velocidad requerida de inmediato, se suman valores sucesivos de velocidad en forma constante a partir de 0 hasta alcanzar el valor programado. La respuesta del sistema, es decir, la velocidad real alcanzada por el efector final, también se muestra en el diagrama.

Si el movimiento que se muestra en la figura 7.10(b) fuera parte de una tarea de soldadura por arco, un paro en el punto  $P2$  causaría la acumulación excesiva de material de soldadura. Es por esta razón que las instalaciones de este tipo están equipadas para eliminar las rampas de aceleración y desaceleración en un punto dado si así se requiere. El punto  $P2$  se programaría como un *punto continuo* y la velocidad requerida permanecería constante excepto durante el intervalo de tiempo durante el cual la computadora calcula la longitud de la trayectoria y el número de intervalos de tiempo para el movimiento después del punto  $P2$ . La velocidad real del portaelectrodos de soldadura a través del punto continuo se ve en la figura 7.10(c).

### **Control de trayectoria continua (CP)**

El control de trayectoria logrado mediante la interpolación de puntos en el control punto a punto con frecuencia se denomina control de trayectoria continua (CP). Esta sección está dedicada a otra forma de control de trayectoria continua, una en la cual la trayectoria se determina en la etapa de enseñanza conduciendo el manipulador a través de todo el proceso. En el modo de enseñanza, las coordenadas de máquina se registran a intervalos regulares de tiempo (5-100 ms) conforme el manipulador se mueve a través de los movimientos requeridos. La tarea de la computadora consiste en utilizar esta información para reproducir los movimientos originales con tanta precisión como sea posible. En los sistemas más sencillos, los conjuntos de coordenadas se leen desde la memoria a la misma velocidad con la que se registran y se utilizan directamente como puntos de referencia para los sistemas de control de la posición.

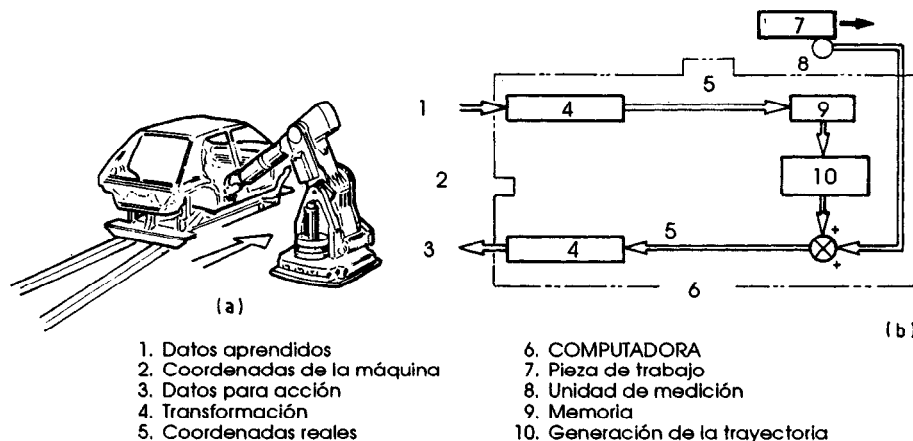
A diferencia del control punto a punto el número de puntos en un programa controlado de manera continua está relacionado en forma directa con el tiempo durante el cual se ejecuta el programa; por ejemplo, un programa de 5 minutos que opera con un tiempo de muestreo de 10 ms tiene 30 000 puntos. Un robot característico para aplicación de pintura en rocío puede registrar 30 minutos de operación; esto se logra si se almacena la información en cinta o disco, vaciándose algunos segmentos del programa a la memoria de acceso aleatorio (RAM) según se requiera.

## Seguimiento

Muchas aplicaciones industriales requieren que un robot lleve a cabo una tarea sobre una parte en movimiento. Dos ejemplos son la soldadura por puntos de unidades de carrocería de automóviles en una línea en movimiento constante y la pintura de partes de trabajo que pasan frente a un robot montadas en una línea aérea de transporte. Es poco probable que se logre una operación satisfactoria si se enseña al robot mientras la pieza de trabajo se está moviendo, dado que cualquier discrepancia entre la velocidad de la línea cuando se realiza la enseñanza y la velocidad de la línea cuando el robot funciona en modo automático, desplazará la pieza de trabajo a partir de la posición esperada por el robot.

El seguimiento es la habilidad de un robot para aplicar un programa aprendido con una pieza de trabajo estacionaria, a una situación en la cual la pieza de trabajo se está moviendo. El seguimiento se logra al monitorear la posición de la parte y añadir continuamente su desplazamiento con respecto a la posición enseñada a la posición deseada del efector final. Los cálculos relevantes deben llevarse a cabo en coordenadas reales, por lo que es necesario emplear un control computarizado que tenga la habilidad para transformar coordenadas de máquina en coordenadas reales y viceversa.

Considérese la operación de soldadura por puntos que se muestra en la figura 7.11(a). La memoria contiene coordenadas reales programadas calculadas a partir de los ángulos de las articulaciones generados durante la enseñanza en una parte estacionaria (figura 7.11(b)). En el modo automático, estas coordenadas almacenadas se usan para generar una serie de



**Figura 7.11** Soldadura por puntos sobre una banda transportadora continua: (a) distribución general; (b) las coordenadas reales se almacenan en la memoria y se modifican por la medición de la posición de la banda transportadora antes de transformarse a coordenadas de máquina.

coordenadas que constituyen la ruta requerida para el dispositivo de soldadura. El desplazamiento de la banda transportadora a partir de la posición enseñada se monitorea en forma constante y este desplazamiento se agrega a cada uno de los puntos en la trayectoria generada (Hohn, 1978). De esta forma, el programa sigue la línea y si el movimiento de la línea es paralelo al eje  $y$ , como en este caso, entonces sólo se modificarán las coordenadas  $y$  en la generación de la trayectoria. La trayectoria modificada se transforma entonces, en la forma usual para generar los ángulos de articulación requeridos por el manipulador.

### ***Alteraciones en línea del programa***

Algunos robots industriales actuales permiten alterar un programa durante su ejecución. Por lo general la estructura del programa debe permanecer intacta, pero los parámetros como las coordenadas de un punto, la velocidad de la trayectoria o la conmutación de las salidas, pueden alterarse.

Considérese un sistema de visión de un robot que utiliza una cámara de televisión para representar objetos que se aproximan sobre una banda transportadora. La cámara está conectada a una microcomputadora que a su vez se comunica con la computadora del robot a través de un enlace RS232. El sistema de visión por microcomputadora tiene la capacidad para detectar un objeto y determinar sus coordenadas en la banda transportadora. Sin importar la ubicación del objeto, la tarea del robot consiste en acercarse a él, levantarlo y depositarlo en un paquete en una posición conocida. El robot se programa para buscar las coordenadas del objeto desde la microcomputadora externa y cuando la computadora del robot recibe dichas coordenadas, éstas se transmiten de inmediato a la microcomputadora para su verificación. Si son correctas, se transmite una señal de aprobación al robot y se permite que el programa continúe.

## **7.3 Enseñanza**

En esta sección se consideran los diversos sistemas que permiten a un operador enseñar una tarea a un robot paso por paso. Uno de los métodos de enseñanza más comunes requiere que el efector final se desplace en forma manual a través de la secuencia de movimientos requerida; otro comprende el uso de un manipulador modelo. Además también es posible la enseñanza desde una "botonera" remota; las instrucciones también pueden enviarse a la computadora desde un teclado montado en el cubículo de control. La enseñanza no es el único método para instalar un programa en la memoria de la computadora; un programa puede compilarse fuera de línea, es decir, sin el uso de un manipulador o computadora para el robot, y transmitirse después al robot (véase la sección 7.4). Sin embargo, la

presente sección se limita a la enseñanza. Se identifican tres métodos de enseñanza:

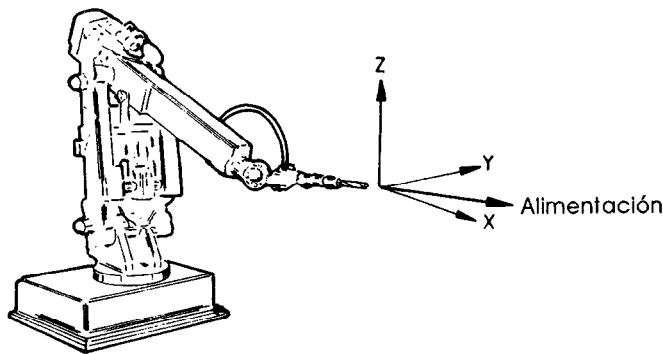
- Guía manual: comúnmente una aplicación de rocío de pintura.
- Ruta dirigida: enseñanza mediante el movimiento del efector final desde una "botonera" manual; la programación de los puntos, funciones, etc., es posible desde la "botonera" y, tal vez, desde un teclado.
- Programación en línea: todas las instrucciones se introducen en forma directa a la computadora a través de un teclado, incluyendo los valores numéricos de las coordenadas.

### ***Métodos de enseñanza***

El método para enseñar a un robot depende de su construcción y la aplicación a la que estará destinado. Considérese una actividad como el rocío de pintura, en la cual el requisito consiste en enseñar al robot una secuencia de movimientos y los puntos en los cuales la pistola de rocío debe apagarse y encenderse. Esto se logra a través de un movimiento dirigido o guiado manualmente. Con el control en el modo de enseñanza, el operador sujeta la pistola montada en el manipulador y la guía a través de la operación de rociado. Durante el proceso, es necesario desconectar los suministros de energía al manipulador de manera que los distintos ejes puedan moverse en forma manual con facilidad. A los resolvedores o codificadores los consulta la computadora a intervalos regulares de tiempo y se registran sus ángulos y desplazamientos. En el modo automático, estos valores pueden transmitirse como puntos de referencia al sistema para control de la posición para cada eje.

Es necesario colocar un contrapeso en los robots de mayor tamaño con el fin de permitir que el manipulador se maneje en esta forma; otra opción es emplear un brazo para enseñanza. Este brazo es simplemente una copia geométrica, un modelo a escala completa, del manipulador mismo, pero equipado sólo con el efector final y dispositivos para medición de la posición sobre cada eje. Este mecanismo más ligero se usa, entonces, para la operación de enseñanza; el control computarizado registra las posiciones sobre los ejes del brazo para enseñanza y después usa estos mismos valores para reproducir los movimientos en el manipulador. (En el capítulo 10 se mostrará cómo se puede usar un mecanismo como el descrito en un sistema teleoperado.

En instalaciones equipadas con varios robots idénticos sólo se necesita un brazo para enseñanza; dicho brazo se conecta fácilmente a la máquina seleccionada para la enseñanza. Se puede esperar que este principio de ahorro se aplique a otras piezas costosas de equipo comunes a más de un robot en una planta y requeridas sólo para la enseñanza, por ejemplo, el controlador, el teclado y la unidad de despliegue de video (VDU).



**Figura 7.12** Operación de perforación: dirección de alimentación requerida a un cierto ángulo con respecto a los tres ejes.

La “botonera” manual también se usa en forma extensa para la enseñanza de robots. Este dispositivo es esencial para aquellas aplicaciones en las que se requiere que un operador maneje con precisión el efector final hasta las posiciones definidas. En general, el controlador cuenta con seis pares de controles que mueven seis ejes en ambas direcciones. Los controles, que utilizan palancas de mando o botones, pueden mover cada actuador en forma directa. Por otro lado, si el control computarizado tiene la capacidad para controlar la ruta que sigue el efector final (véase sección 5.4), el controlador manual producirá movimientos en coordenadas reales con otros marcos de referencia, cuando el robot se encuentre en el modo de enseñanza.

Una operación de perforación realizada por un robot ofrece un ejemplo de una situación de enseñanza en la que es necesario este tipo de instalación (figura 7.12). Un operador coloca el taladro neumático, con la “botonera”, en la posición del orificio a perforar. Durante la colocación del taladro, los controles de la “botonera” manual producen movimientos en coordenadas reales. Por ejemplo, el botón SACAR (*OUT*) produce un movimiento en la dirección *X*, mientras que las otras cinco coordenadas permanecen inalteradas (control desacoplado). Al enseñar la alimentación del taladro, la computadora se transfiere a un sistema de coordenadas del efector. Cuando se ha realizado la operación anterior, los controles de la “botonera” manual se relacionan con la dirección hacia la cual apunta el efector final, de manera que al oprimirse el botón SACAR (*OUT*) se produce un movimiento en línea recta sobre el eje del taladro.

Durante la enseñanza puede ser necesario programar una diversidad de funciones. Es posible que sea necesario cambiar ciertos parámetros como la velocidad de la herramienta durante el transcurso del programa y que el operador necesite contar con retroalimentación de información sobre el estado del sistema. La información se despliega en la forma de luces o *LEDS* en la “botonera” manual, o en la unidad de despliegue de video



en el cubículo de control. El diseño de las “botoneras” manuales varía en forma considerable; los fabricantes deben establecer un balance entre la incorporación de control de todas las funciones y el despliegue de información completa en la “botonera” manual, a la vez que evitan una “botonera” innecesariamente compleja. La “botonera” ideal será una fácil de usar y que aun así cuente con las capacidades descritas, además, que tal vez suministre información a través de un medio visual en una pequeña unidad de despliegue de video plana, o a través de un medio audible que utiliza sintetizadores de voz.

Un importante dispositivo de seguridad de la “botonera” manual es que funciona bajo el principio del botón muerto; en este sistema el movimiento del manipulador se detiene cuando se sueltan todos los controles de la “botonera” manual.

### Ejemplo de un programa

Considérese la enseñanza del programa que se presenta en la sección 7.2 a un robot *Cincinnati Milacron T3* (Cincinnati, 1980a. Esta máquina se conduce a través de su ruta con la “botonera” manual que se muestra en la figura 7.13. Los puntos del programa ya sea con las señales de ENCEN-

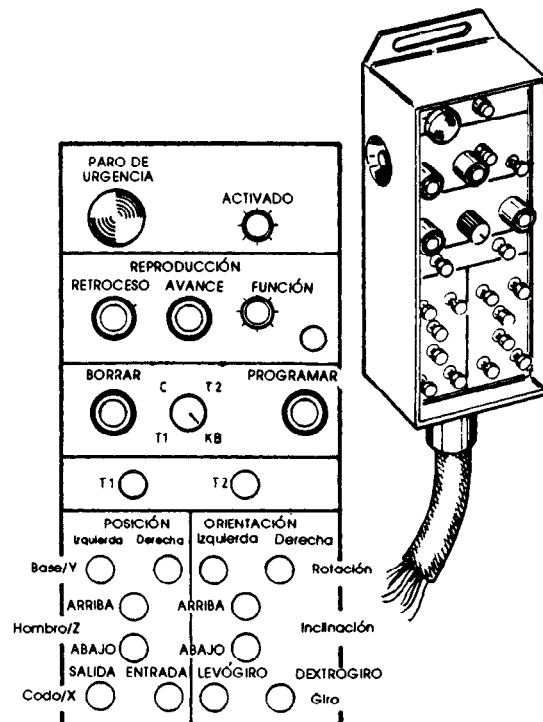


Figura 7.13 “Botonera” para la enseñanza del robot *Cincinnati Milacron T3*.

DIDO o APAGADO o sin ellas, pueden transmitirse a dos conexiones de herramienta. Durante el transcurso de la enseñanza, el robot puede desplazarse a través de los movimientos ya programados con botones de avance y retroceso. Todas las otras funciones, por ejemplo un cambio de velocidad, deben introducirse por medio del teclado en el cubículo de control.

Durante la enseñanza, toda la información sobre el punto actual se despliega en la unidad de despliegue de video (VDU); esto incluye la secuencia y el número de punto, la función programada, la velocidad y las coordenadas reales del punto central de la herramienta (TCP). El programa podrá seguirse haciendo una lista de los números de los puntos sobre la función programada en cada punto:

0.001	HOME	(Secuencia 0, punto 1)
0.002	CYCLE START	(El ciclo regresa a este punto)
0.003	OUTPUT +03	(Se ENCIENDE la salida 3)
0.004	WAIT, UNTIMED, +S07	(La secuencia continúa después de ENCENDIDA la entrada 7)
0.005	PERFORM 1, +S09	(Comenzar la secuencia si la entrada 9 está ENCENDIDA)
0.006	NOP	(Ninguna operación)
0.007	OUTPUT -03	(APAGAR salida 3)
0.008	WAIT, UNTIMED, +S06	(La secuencia continúa después de ENCENDIDA la entrada 6)
0.009	PERFORM 2, +S08	(Comenzar la secuencia 2 si la entrada 8 está ENCENDIDA)
0.010	NOP	
CLOSE PATH TO 0.002		(Regresar al inicio del ciclo)
1.001	NOP	(Inicio de la secuencia 1)
1.002	+T1A	(Señal ENCENDIDO al controlador de soldadura)
	⋮	Soldando activamente
1.010	-T1A	(Señal APAGADO al controlador de soldadura)
1.011	NOP	
CLOSE PATH TO 0.006		(Regresar a secuencia de línea principal)
2.001	NOP	(Secuencia 2 similar a secuencia 1)
2.002	+T1A	
	⋮	
2.010	-T1A	
2.011	NOP	
CLOSE PATH TO 0.002		pero con distinta instrucción para cierre de ruta)

Existen dos puntos que vale la pena notar. Resulta una buena práctica determinar la estructura del programa antes de recurrir a la máquina. Una

vez realizado lo anterior, el operador sabe, por ejemplo, que debe programar un punto auxiliar en 0.006 (NOP); este punto es necesario para cerrar la ruta al final de la secuencia 1. Con excepción de la ubicación del cierre de ruta, las secuencias 1 y 2 son idénticas. En realidad, la secuencia de soldadura se recorre sólo una vez, cuando se programa la secuencia 1. La secuencia 2 se crea desde el teclado mediante un dispositivo para copiado que usa la secuencia 1 como modelo e inserta el cierre de ruta apropiado, en este caso 0.002.

Una instrucción como la contenida en 0.005 es un salto condicional; en este caso, si la entrada 9 está encendida, lo cual indica que la parte está cargada correctamente, se lleva a cabo la secuencia 1. La instrucción se ignora si la entrada está apagada.

Un lenguaje de computadora es una estructura formal de órdenes que permite que un operador comunique instrucciones a la máquina; por inferencia, entonces, cualquier robot tiene un lenguaje, en el sentido de que el operador debe aprender el método correcto para introducir información al control computarizado. Lo normal es que los lenguajes de máquina sean creados para introducirlos sólo a través del teclado, pero en un robot se necesitan métodos diferentes; además del teclado, se requieren “botonearas” para enseñanza o brazos para enseñanza, que permitan que las instrucciones se comuniquen a la computadora.

## 7.4 Software

No debe exigirse que el operador de un robot tenga un conocimiento detallado de las operaciones aritméticas y lógicas que se llevan a cabo en la ejecución de una tarea. De aquí que todas las máquinas cuenten con *software* propio que permite que las instrucciones se comuniquen al robot en un lenguaje que el operador pueda entender fácilmente. El robot ideal deberá aceptar instrucciones verbales en un lenguaje natural y, como se verá en los capítulos 8 y 10, los sistemas para reconocimiento e identificación de voz se encuentran ya en una etapa muy avanzada. Sin embargo, las máquinas actuales requieren que el operador utilice un lenguaje formal como interfase entre el control del robot y el medio externo.

Entre mayor sea el nivel del lenguaje, más sencillas serán las instrucciones requeridas del operador. Esto, sin embargo, será a costa del esfuerzo y tiempo de computadora adicionales requeridos para convertir las instrucciones en lenguaje máquina, es decir, el lenguaje del microprocesador. Se considerarán cuatro aspectos muy amplios del lenguaje: lenguajes objetivo, lenguajes robot, lenguajes de alto nivel y lenguajes de ensambladores y de máquina.

### ***Lenguaje objetivo***

Los lenguajes robot objetivo permiten que la tarea se especifique en forma general, por lo normal escrita en un lenguaje natural; por ejemplo, "ensamblar 3 bombas del tipo 30". Los lenguajes objetivo requieren una elevada potencia de cómputo para interpretar las órdenes y cabe esperar que los avances en la inteligencia artificial y en las técnicas para reconocimiento de voz (Levas y Selfridge, 1983) lleven al diseño de robots que puedan enseñarse y programarse por medio de un lenguaje natural hablado (Evard y colaboradores, 1982). Un ejemplo de esto es el lenguaje RAPT (Poppels-tone y colaboradores, 1978; Ambler y colaboradores, 1982) creado en Edimburgo. Este lenguaje funciona con marcos de referencia definidos en relación con objetos más que en relación con el manipulador mismo.

### ***Lenguajes comerciales***

La lentitud de los lenguajes de alto nivel para propósitos generales y su ineficacia para realizar operaciones de entrada y salida, los han hecho poco atractivos para el control de robots; se prefiere el empleo de lenguajes especiales para robots.

Los métodos de enseñanza estudiados en la sección 7.3 requieren el uso del robot en el sitio real de trabajo, junto con cualesquiera otras piezas de trabajo de la planta y prototipos asociados. Esto puede resultar poco deseable en un sistema de producción en lotes pequeños, ya que el equipo tendría que estar apagado con frecuencia durante las sesiones de enseñanza. Como el conjunto de instrucciones y datos que constituyen un programa robot se almacenan en una memoria digital; es posible transmitirlo con facilidad a la computadora del robot desde una computadora externa. Este proceso se denomina *programación fuera de línea* (Tarvin, 1980). Lo anterior no debe confundirse con la capacidad para cargar un programa desde un dispositivo externo de memoria, dado que en esta situación el programa tendría que haberse escrito inicialmente utilizando el robot. La programación fuera de línea permite que un programa se escriba en una forma compatible con el control del robot pero que no requiere el controlador ni el manipulador para el proceso de escritura.

El uso de la programación en lugar de la enseñanza tiene las siguientes ventajas:

- No se interrumpe el uso del equipo de producción.
- Se eliminan los peligros de seguridad ya que el operador no está dentro del volumen de trabajo del manipulador.
- Los lenguajes para robot de alto nivel pueden usarse para simplificar gran parte del trabajo que se requiere en la escritura de un programa.

- Se puede tener acceso directo a los datos en los sistemas de diseño asistido por computadora (CAD) para incorporarlos al programa. (Véase la sección 1.9).

La enseñanza, sin embargo, ofrece la oportunidad de validar el programa *in situ* y es poco probable que se presenten errores como choques con otros equipos. Es necesario protegerse contra estos errores de programación, ya sea empleando *software* complejo, o haciendo que el programador simule los movimientos del manipulador en una unidad de despliegue de video.

El objetivo de un lenguaje robot es hacer que se facilite al operador la definición de la tarea que tiene que llevar a cabo un robot. Los lenguajes de robot se clasifican en las siguientes categorías, las cuales requieren que

- se especifiquen las coordenadas de máquina,
- se especifiquen las coordenadas del efector final,
- solamente se definan las coordenadas de la pieza de trabajo.

Existen muchos lenguajes robot en el mercado (Gruver y colaboradores, 1983) y se refiere al lector a la literatura indicada para mayores detalles. En la tabla 7.1 se incluyen algunos de los lenguajes disponibles en la actualidad:

Tabla 7.1

ADA	Volz y colaboradores (1983)
AL	Mujtaba (1980), Mujbata y Goldman (1979)
AML	IBM (1981)
Animate	Kretch (1982)
APT (véase MCL y RAPT)	
AUTOPASS	Lieberman y Wesley (1977)
HELP	Donato y Camera (1981)
JARS	Gruver y colaboradores (1983)
MCL	Wood y Fugelso (1983)
RAIL	Automatix (1981)
RAPT	Popplestone y colaboradores (1978)
RPL	Park (1981)
Sigla	Sigma (1980)
VAL	Carlisle y colaboradores (1981), VAL (sin fecha)

### ***Lenguajes de alto nivel***

Los lenguajes de alto nivel, como BASIC y FORTRAN, simplifican la tarea del programador durante la elaboración y la captura de programas: están orientados al usuario. Un programa en un lenguaje de alto nivel genera muchas instrucciones al traducirlo a un código de máquina. Con FOR-

TRAN lo anterior se lleva a cabo después de que el programa se escribe mediante un proceso denominado *compilación*; las instrucciones de máquina, o sea, el programa compilado, se almacenan en la memoria. Los lenguajes como BASIC se almacenan como una lista de instrucciones de alto nivel cada vez que el programa se ejecuta, se *interpretan* las instrucciones, es decir, se traducen a un código de máquina línea por línea; por lo tanto, los programas de lenguaje interpretado tienden a ejecutarse con mayor lentitud.

Cuando ciertas operaciones de un programa se deben llevar a cabo con frecuencia, es posible acelerarlas escribiéndolas directamente en código máquina. En realidad, al operar un robot desde una microcomputadora para fines generales, la estructura principal del programa está invariablemente escrita en un lenguaje de alto nivel (por lo general BASIC); en éste, las operaciones que se usan con mayor frecuencia, por ejemplo, el algoritmo de control o las transformaciones de coordenadas, se cargan en subrutinas en código de máquina.

### ***Ensamblador y lenguaje de máquina***

Los programas en lenguaje ensamblador se escriben utilizando las formas nemotécnicas que representan cada instrucción del microprocesador (MPU). Escribir un programa en un lenguaje ensamblador requiere un conocimiento detallado de la operación del microprocesador. Asociada a cada forma nemotécnica está la dirección de los datos por manipular. Antes de que el programa pueda ejecutarse, se necesita un programa de ensamblado para traducir el lenguaje ensamblador a código de máquina.

El objetivo de este texto no es enseñar la programación de microprocesadores. Su intención es más bien hacer que se entiendan los procesos relacionados con la traducción de las instrucciones del operador a un control adecuado del manipulador. Con este fin, se ha seguido la jerarquía de lenguajes del sistema, a partir de los lenguajes de alto nivel, hasta llegar en última instancia a los lenguajes de máquina, que son códigos utilizados por el microprocesador.

Los elementos de un microprocesador pueden adoptar solamente uno de dos estados eléctricos -ENCENDIDO (ON) o APAGADO (OFF). Por lo tanto, son en particular adecuados para un sistema binario en el cual APAGADO es el equivalente a 0 y ENCENDIDO es el equivalente a 1. Un solo número binario se denomina un *bit* y los microprocesadores pueden procesar "palabras" de 4, 8, 16 ó 32 bit. Una palabra de ocho bit, como 10101100, se denomina un *byte*. Un byte se transmite en paralelo a través de ocho líneas de datos del conductor colectivo o canal que conecta los elementos de un microprocesador.

Los números binarios sufren la limitación de que se requieren grandes cadenas de bit. La escala hexadecimal permite una presentación más

compacta al escribir los números en base 16. Las letras A a F representan los números decimales 10 a 15 y un número hexadecimal se denota con el prefijo \$. Un byte requiere dos dígitos en forma hexadecimal, por lo que el número decimal 138, por ejemplo, es equivalente a \$8A.

Un sólo microprocesador cuenta con una serie de elementos funcionales que se comunican unos con otros para transportar las instrucciones enviadas al MPU. Un microprocesador, MPU, ejecuta un programa en código de máquina al leer y llevar a cabo en secuencia las instrucciones contenidas en la memoria. El conjunto de instrucciones cuenta con formas nemotécnicas de tres o cuatro letras para cada instrucción, las cuales ayudan al programador mientras escribe un programa en lenguaje ensamblador.

### 7.5 Equipo para control por computadora

La parte que alberga el control de la computadora contiene los diversos sistemas requeridos para satisfacer las funciones de la máquina. En esta sección se considera el equipo necesario para llevar a cabo los cálculos y las operaciones lógicas, controlar la posición y la velocidad, proporcionar la energía necesaria e interactuar con el operador y otros equipos.

#### *Microprocesadores*

Uno o más microprocesadores integran la unidad central de procesamiento (CPU) que maneja los cálculos y operaciones lógicas necesarias para controlar el robot. El "chip", nombre más familiar del microprocesador, es una delgada placa de silicio. En esta placa se puede fabricar un circuito integrado a gran escala (*Large-scale integrated circuit*, LSI) compuesto por transistores, diodos y resistores. Con frecuencia el chip se encapsula en un material plástico o cerámico, con conexiones que generalmente salen a través de 20 pines en cada lado, con lo que se forma un paquete estándar dual en línea (DIL) con 40 pines.

Existen dos métodos comúnmente usados para fabricar microprocesadores. Los dispositivos bipolares se construyen con base en circuitos de lógica transistor a transistor (*transistor-transistor logic*, TTL), lógica acoplada al emisor (*emitter-coupled logic*, ECL) o lógica de inyección integrada (*Integrated injection logic*, IIL). Estos dispositivos pueden encontrarse en muchos de los controles de un robot ya que su operación es extremadamente rápida, y esto es necesario para realizar los complejos cálculos requeridos por los robots con movimientos controlados sobre una ruta. Los circuitos bipolares no son tan compactos como lo son otros; por ejemplo, es posible que sean necesarios varios chips para llevar a cabo las mismas funciones que un procesador de metal óxido y semiconductor (MOS).

Los circuitos de microprocesador pMOS y nMOS están contruidos respectivamente de transistores de efecto de campo de canal (FET) p y n. Los microprocesadores con MOS complementarios (CMOS) utilizan transistores de efecto de campo (*field-effect transistors*, FET) tanto tipo p como tipo n y aunque son más lentos que sus equivalentes pMOS Y nMOS, tienen las ventajas de una mayor tolerancia a variaciones en la línea de suministro de potencial y bajo consumo de energía. Por ejemplo, el HMCS 42/43 de Hitachi (Money, 1982), del tipo pMOS, consume 100 mW a 10 V; el HMCS 42C, un equivalente del tipo CMOS, consume 1.5 mW a 5V.

Los microprocesadores comunes tienen un intervalo de operación de 0°C a 70°C. Por lo general, como su consumo de energía es reducido, la disipación de calor no es problema. El calor generado por otros elementos como las pantallas de despliegue visual o la unidades de potencia es mucho mayor y es posible que sea necesaria la instalación de un ventilador de enfriamiento con el fin de evitar que la temperatura del ambiente del microprocesador sea demasiado elevada.

### ***Dispositivos asociados al microprocesador***

Asociados al microprocesador se encuentran los dispositivos de memoria que almacenan la secuencia de instrucciones que debe llevar a cabo el CPU y los datos que han de operar o generar dichas instrucciones, así como los dispositivos de entrada y salida a través de los cuales el CPU recibe y transmite señales desde otros sistemas y hacia ellos.

Las instrucciones y los datos que deben retenerse en forma permanente en un sistema en particular se almacenan en una memoria de sólo lectura (ROM). El microprocesador sólo puede interrogar a la memoria de sólo lectura, es decir, puede leer los datos o instrucciones pero no puede modificarla. La memoria de sólo lectura es no volátil, es decir, la memoria no se pierde cuando se interrumpe el suministro de energía al dispositivo.

Como se indicó antes, las memorias de sólo lectura se fabrican utilizando tecnología bipolar o MOS y aunque son bipolares contienen un menor número de posiciones de memoria que los dispositivos MOS en un área dada y consumen una mayor cantidad de energía; tienen un tiempo de acceso común de un décimo del de los dispositivos MOS. Las ROMs están programadas por enmascaramiento; este proceso se lleva a cabo durante la etapa de manufactura, cuando el programa se "quema" en forma permanente en el chip. Las memorias de sólo lectura programables (PROM) contienen enlaces fusibles entre los elementos del circuito; al fundir ciertos enlaces seleccionados, un programador de PROM puede instrumentar un cierto programa en el chip.

Las PROM borrables (EPROM) llevan la flexibilidad de las PROM un paso adelante. Es posible borrar toda la memoria al exponer el chip, que está cubierto por una ventana de cuarzo, a luz ultravioleta durante 30



minutos. El dispositivo puede entonces reprogramarse. Para borrar la EPROM, es necesario quitarla del circuito, mientras que la ROM modificable por medios eléctricos (EAROM) tiene la ventaja de permitir que segmentos definidos de la memoria se borren mediante la aplicación del potencial correcto a ciertas conexiones específicas mientras el dispositivo forma parte del circuito.

Sin importar el método de programación o reprogramación que se emplee, las memorias de sólo lectura contienen información que no se destruye cuando se apaga la máquina. El conjunto de instrucciones que es específico al control del robot y que no requiere modificación se almacena, por lo general, por consiguiente, en una ROM. Por ejemplo, las instrucciones para calcular los ángulos de las articulaciones a partir de coordenadas cartesianas se han de almacenar en una memoria de sólo lectura que estará disponible para la unidad central de procesamiento en todo momento. La dimensión de la herramienta usada en este cálculo es, sin embargo, una cantidad variable que depende de la herramienta en particular a utilizar, por lo que esta información deberá almacenarse en una memoria de acceso aleatorio (RAM).

La unidad de procesamiento central puede leer o almacenar información en una RAM; en donde "acceso aleatorio" significa que el acceso a cualquier dirección deseada se puede llevar a cabo en un tiempo fijo. Una RAM es volátil, es decir, los datos se retienen sólo mientras la unidad está encendida. En general, una memoria RAM se utiliza para almacenar todos los datos y programas que ha generado ya sea el operador o la unidad de procesamiento central misma. Existen memorias de acceso aleatorio estáticas y dinámicas. Las RAM estáticas, que se fabrican con base en circuitos TTL, pueden manejar datos a muy alta velocidad. Las RAM dinámicas, fabricadas usando tecnología MOS, consumen una menor cantidad de energía y cuentan con un almacenamiento más compacto que el de los dispositivos estáticos, pero requieren circuitos adicionales para proveer una señal de refresco. Se requiere que esta señal se emita a intervalos regulares dado que la información se almacena en la forma de cargas capacitivas y debe ser reescrita en forma constante varias veces por segundo dado que las cargas se disipan.

Para poder funcionar como controlador de un robot, una unidad de procesamiento central debe ser capaz de transmitir y recibir datos hacia otros sistemas y desde ellos; para esto se utilizan dos métodos:

- El *mapeo de la memoria*, que consiste en el uso de localidades temporales en la memoria dentro de la RAM principal; estos registros pueden, a su vez, transmitir o recibir datos hacia o desde otros dispositivos. La CPU considera estos registros simples posiciones RAM y se comunica con ellos en forma congruente. El término *poke* se refiere a registrar datos en una posición de memo-

ria; el término *peek* aplicado a una posición es leer, pero sin alterar, los datos almacenados en ella.

- Los *puertos de entrada/salida (I/O)* permiten una comunicación más directa entre la CPU y los dispositivos externos, que se conocen como dispositivos periféricos.

### Control de ejes

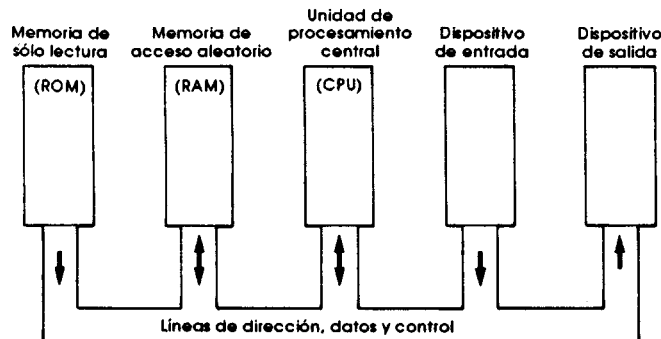
En el capítulo 5 se explicó cómo pueden instrumentarse sistemas de control continuos y digitales para lograr un control en malla cerrada de la posición de un sólo eje del robot. El valor del punto de referencia está disponible en su forma digital en la CPU; este valor puede usarlo en forma directa un sistema digital o convertirse a su forma analógica para servir de entrada a un sistema continuo. El sistema de control completo, por lo general se monta en una tarjeta de circuito impreso (la tarjeta del actuador del eje); cada eje cuenta con un sistema similar.

### Conductores colectivos (buses)

En la figura 7.14 se muestra un sistema microprocesador consistente de una unidad de procesamiento central, una memoria y puertos de entrada y salida. La CPU se comunica con otros dispositivos a través de tres conjuntos de cables denominados conductores colectivos (*buses*).

A través del conductor colectivo de control, la unidad de procesamiento central transmite señales para colocar la memoria en modo de lectura o escritura y para sincronizar las transmisiones de datos. El número que identifica la localidad de memoria en la que se han de realizar las operaciones *peek* o *poke* se transporta por el canal de la dirección, mientras que el canal de datos maneja la información real.

En una microcomputadora los conductores colectivos están impresos en la tarjeta que incorpora la mayoría de los componentes de la máquina;



**Figura 7.14** Sistema microprocesador básico: la unidad de procesamiento central se comunica con la memoria y los dispositivos de entrada y salida a través de un canal común.

en un control de robot, en cambio es más importante que se pueda tener acceso fácil a todos los sistemas para poder realizar pruebas y mantenimiento que el que la unidad sea de tamaño reducido. Por lo tanto, el método más usual y práctico para construir el control consiste en dedicar paneles o tarjetas independientes a cada subsistema, por ejemplo, tarjeta de la CPU, tarjetas para los actuadores de los ejes. Todas las tarjetas se deslizan en bastidores estándar en el cubículo o sección de control, conectándose a los conductores colectivos en la parte posterior del bastidor.

### ***Fuentes de poder***

La fuente de toda energía eléctrica, neumática o hidráulica para un robot industrial es un suministro de energía eléctrica unifásica o trifásica. El cubículo de control requiere una diversidad de potenciales de corriente directa (DC) para los componentes electrónicos, las luces indicadoras, las salidas y las entradas, así como un suministro de corriente alterna (AC) para las pantallas de tubo de rayos catódicos (CRT) y las salidas y entradas (AC). El potencial AC requerido (por lo general 110 V) se obtiene mediante la transformación del suministro principal; los potenciales de corriente directa se obtienen mediante una rectificación. Los dispositivos de estado sólido varían en cuanto a su tolerancia a variaciones en el potencial del suministro de energía eléctrica, por lo que la mayoría de las fuentes de poder están controladas por reguladores automáticos de potencial (AVR).

Las RAM requieren un suministro continuo de energía eléctrica con el fin de retener los datos; esta capacidad se obtiene, con frecuencia, al hacer “flotar” el suministro requerido a través de baterías de níquel-cadmio. Si el suministro del regulador automático falla por cualquier razón, por ejemplo, la pérdida de la fuente principal de suministro, el suministro de potencial a la RAM se mantiene con estas baterías y con diodos que evitan que la corriente fluya de regreso al regulador.

### ***Teclados y “botoneras”***

Como se vio antes, la mayoría de los robots industriales están equipados con dos dispositivos que permiten al operador introducir información e instrucciones directamente al control de la computadora: un teclado montado, por lo general, en el cubículo de control y una “botonera” manual conectada al control por medio de una línea flexible. Un ejemplo característico se mostró en la figura 7.13.

En general, el teclado presentará al operador un botón para cada letra del alfabeto, distribuidos en orden alfabético o en forma QWERTY (como en una máquina de escribir). Con frecuencia se emplean botones o teclas específicas para evitar la tediosa operación de oprimir botones para instrucciones usadas con más frecuencia. El teclado podrá conectarse en forma directa a un puerto de entrada y salida del sistema microprocesador o

puede suministrarse un sistema independiente para interpretar las entradas desde el teclado y transmitir datos que resulten apropiados para la unidad central de procesamiento. Desde el punto de vista de la seguridad, en ocasiones se incluye un botón de paro en el teclado y en el panel de control de los robots más poderosos. A diferencia de la mayoría de los botones del teclado, el interruptor de paro tiene una conexión directa; cuando se oprime este botón se interrumpe en forma directa el suministro de energía a los motores eléctricos o a la unidad de potencia hidráulica del robot.

Una “botonera” manual permite al operador dar instrucciones al control mientras observa el efector final desde cualquier perspectiva. Con la excepción del botón de paro, los controles en la “botonera” se operan por medio de *software*, es decir, inician señales de datos a los puertos de entrada del sistema microprocesador. En la sección 7.2 se remarcó la conveniencia de contar con controles de *software*. Esto permite a la CPU interpretar las señales de la “botonera”; de este modo, varios interruptores individuales pueden cubrir múltiples funciones, según el modo de operación.

### ***Pantallas visuales***

Durante el proceso de enseñanza el operador requiere información sobre el estado del sistema. Existen tres métodos comunes de suministrar esta información: diodos emisores de luz (LED), pantallas de cristal líquido (LCD) y tubos de rayos catódicos (CRT).

Los diodos emisores de luz de siete segmentos con caracteres en verde, rojo o amarillo y las pantallas de cristal líquido familiares en las calculadoras de bolsillo, son útiles como pantallas en las “botoneras” debido a lo reducido de sus requerimientos de energía eléctrica.

El tubo de rayos catódicos se usa como unidad de despliegue de video (VDU) en el cubículo de control si es necesario presentar simultáneamente varias piezas de información. La salida de la unidad de despliegue de video se configura en la computadora y cada carácter se construye, por lo general, con base en una matriz de puntos de 5 puntos de ancho  $\times$  7 de alto (algunos puntos adicionales separan los caracteres en sentido horizontal y vertical).

### ***Entradas y salidas***

Se requieren conexiones de entrada y salida en el controlador del robot de manera que se puedan operar las tenazas y otros dispositivos externos y que se puedan aceptar las señales de todo tipo de sensores (Coiffet, 1983). Estas conexiones pueden ser CA o CD y digitales o analógicas. Cuando se utiliza CD el estándar es 24 V; para las conexiones CA se utilizan 110 V. Las salidas se conmutan o transforman (es decir, se pulsan) bajo el control del programa; el programa puede interrogar las entradas. Cuando se requiere una entrada, el potencial se toma de un suministro común en el cubículo de control; un dispositivo externo puede entonces encender la entrada

completando el lazo de corriente de regreso a la conexión de entrada. Algunos robots industriales cuentan con equipo para hacer conexiones analógicas. Una señal analógica de un sensor, por ejemplo, desde un puente amplificador de galgas tensométricas, podría, entonces, aceptarse en forma directa, con lo que se haría posible accionar dispositivos analógicos, por ejemplo un servomecanismo de tenazas neumáticas para control de la fuerza. Se utilizan circuitos de conversión digital a analógico (D/A) y analógico a digital (A/D) para establecer interfases entre los puertos de entrada y salida y las conexiones externas.

### ***Interfases***

Las entradas y salidas de corriente directa son adecuadas para transmitir señales individuales de ENCENDIDO/APAGADO. Sin embargo, cuando es necesario transferir grandes cantidades de datos entre el control del robot y otra computadora, por ejemplo durante la carga de un programa escrito fuera de línea, se necesitan interfases estándar o “canales estándar”. En la mayoría de los enlaces los datos se codifican de según el *American Standard Code for Information Exchange*, ASCII (Código Estándar Americano para Intercambio de Información), que asigna un número a cada letra, dígito y función para fines de transmisión de datos.

Las interfases pueden ser de tipo serie o paralelo. Un enlace en serie transmite un bit cada vez. Aunque sólo se requieren dos cables para la transmisión de datos, el estándar RS 232C, por ejemplo, utiliza un conector de 25 líneas. Las conexiones se requieren para las distintas señales involucradas en el protocolo que rige la transmisión. Por ejemplo, para enviar los datos, se transmite una señal de “solicitud de envío” a la computadora en el conector 4 y la computadora manda una señal “libre para envío” por el conector 5, lo cual indica que puede comenzar la transmisión de los datos. El número de bit transmitidos por segundo se denomina velocidad de transmisión en baudios. 1 200, 2 400, 4 800 y 9 600 son velocidades comunes en los enlaces seriales.

Las interfases en paralelo pueden manejar mayores velocidades de transmisión en baudios dado que los datos se transmiten una palabra a la vez y existe una línea independiente para cada bit. Algunos ejemplos de enlaces en paralelo son el estándar IEEE 488, que transmite datos de ocho bit a una velocidad de hasta un millón de bit/s, a través de un enlace de 24 líneas con una longitud de hasta 20 m y el S-100 ó IEEE 696, que opera en un enlace de 100 líneas.

### ***Control de un robot por computadora***

Un ejemplo de un sistema comercial resultará muy instructivo. El robot Cincinnati Milacron T3 es una máquina impulsada por medios hidráulicos y el manipulador de brazo articulado tiene seis grados de libertad. Los

elementos del control por computadora (Cincinnati, 1980b) de este robot, el cual es capaz de un control punto a punto con interpolación lineal, se muestran en la figura 7.15.

Todos los cálculos y funciones lógicas se llevan a cabo en la tarjeta del procesador (PRC 32RC) que contiene un sistema procesador de 16 bit formado por cuatro procesadores *Advanced Micro Devices* Am2901B. Estos procesadores de cuatro bit utilizan tecnología bipolar y están diseñados para aplicaciones de control a alta velocidad. Esta tarjeta también incorpora la memoria de sólo lectura que contiene el *software* del sistema. Los datos para programas particulares pueden leerse desde un cartucho de cinta a través de la interfase o registrarse en éste (entrada/salida del cartucho); los programas se almacenan en 32 K de memoria de acceso aleatorio (MEM) la cual está protegida por la unidad de baterías de respaldo (BBU).

La tarjeta de detección de nivel de potencial (VLD) monitorea los siguientes suministros CD desde la unidad de suministro de energía eléctrica (PSU):

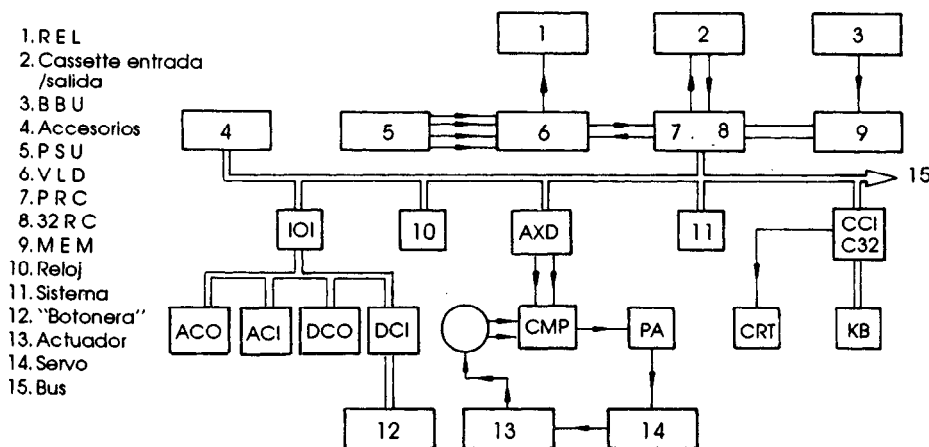
+5V	circuitos lógicos
+12V	circuitos de entrada, salida y servosistema
-12V	circuitos de entrada, salida y servosistema
-16.75V	disco flexible (no mostrado)
+24V	entradas y salidas CD.

La tarjeta de detección de nivel de potencial tiene la capacidad de apagar la máquina disparando relés (REL) en caso de cualquier falla en el potencial de la unidad de suministro de energía eléctrica.

La unidad de reloj (CLK) produce señales senoidales y cosenoidales a 5 kHz a 7 V para los resolutores en el manipulador; además suministra una señal de 10 MHz a la tarjeta de tiempo del sistema (SYS), la cual genera las señales de sincronización para la tarjeta del procesador.

Las interfases de control de la consola (CCI) y la tarjeta de memoria temporal (C32) aceptan las entradas del teclado (KB) usando una notación ASCII estándar y transmiten la información a la tarjeta del procesador. Esta tarjeta CCI/C32 también genera un despliegue en pantalla de 12 renglones  $\times$  32 columnas a partir de la información recibida de la tarjeta del procesador y el despliegue puede verse en el tubo de rayos catódicos (CRT).

Dieciséis entradas y señales de +24 V CD de la "botonera" para enseñanza entran por la tarjeta de entrada CD (DCI) a través de opto-acopladores. De manera similar, dieciséis entradas de CA a 110 V se conectan a la tarjeta de entrada CA (ACI). Las tarjetas de salida CD y CA (DCO y ACO) suministran ocho salidas cada una, y estas cuatro unidades están conectadas a los puertos de entrada y salida (IOI) por medio de un canal común de 20 líneas.



**Figura 7.15** Organización del control por computadora del robot Cincinnati Milacron T3.

Puede verse como la mayoría de los elementos del sistema se comunican con la tarjeta del procesador a través del canal común de 25 líneas. Esto es posible mediante la asignación de una dirección de dispositivo a cada elemento. De esta forma el procesador puede establecer una ruta de comunicación con cualquiera de los dispositivos utilizando las líneas de control y dirección del canal.

Hay seis tarjetas manejadoras de eje (AXD) para los seis actuadores. En el diagrama se muestra una tarjeta manejadora de eje y sus componentes asociados. Todas las tarjetas manejadoras de eje son idénticas y se distinguen por medio de diferentes direcciones de dispositivo. Cada tarjeta acepta una coordenada deseada desde el procesador y pone en práctica la estrategia de control para el actuador correspondiente usando las señales de retroalimentación de posición y velocidad obtenidas del resolovedor y el tacómetro. La tarjeta manejadora de eje genera una señal de error y una señal de compensación (que reduce la velocidad después del error). Estas señales se compensan (CMP) y se amplifican (PA), con lo que se impulsa una servoválvula que alimenta aceite a presión al accionador y se completa así el ciclo de control.

## 7.6 Resumen

La computadora digital es el único medio práctico para satisfacer las demandas de un control flexible para un robot. Se han detallado las distintas funciones que la computadora debe llevar a cabo durante una operación automática. Se han considerado los métodos para comunicar información a la computadora durante las etapas de enseñanza y de programación. Se ha

estudiado el *software* necesario para instrumentar estas funciones, trabajando a partir de los lenguajes de alto nivel, y avanzando hacia el lenguaje de máquina del procesador. Por último, se ha detallado el equipo necesario para crear estos sistemas, junto con un ejemplo de un sistema comercial .

La aplicación de las computadoras al control de los robots abre enormes posibilidades para el procesamiento de información compleja generada a partir de sensores y para avanzados sistemas de inteligencia artificial; estos aspectos se han de estudiar en el siguiente capítulo.



# Capítulo 8

## *Sensores externos e inteligencia*

---

### 8.1 Introducción

En el capítulo anterior se analizaron los problemas relacionados con el monitoreo de las funciones internas del robot.

Ahora se analizará un problema todavía más difícil: el de relacionar al robot con su ambiente externo. Los primeros robots y, en realidad, la mayoría de los existentes en la actualidad eran relativamente tontos; hacían sólo lo que se les ordenaba. Con frecuencia esto era satisfactorio, especialmente en aquellos casos en los que se requerían aplicaciones repetitivas de fuerzas considerables o en donde los ambientes eran hostiles. Estos robots de primera generación no tienen conciencia de su ambiente y seguirán sus instrucciones sin importar si hay cambios en el medio que los rodea. En realidad, para asegurar un funcionamiento con resultados satisfactorios, es necesario colocarlos en un ambiente cuidadosamente estructurado.

La evolución de los robots conduce a una segunda generación que incorpora los sentidos de la vista, el tacto, el oído e, incluso, el olfato y el gusto. Estos sensores externos son en particular importantes en las operaciones automáticas de ensamble, en donde la información visual y táctil es esencial. ¿Puede el lector imaginar lo difícil que resultaría tomar un tornillo y atornillarlo en un orificio si fuera ciego y no tuviera sentido del tacto?

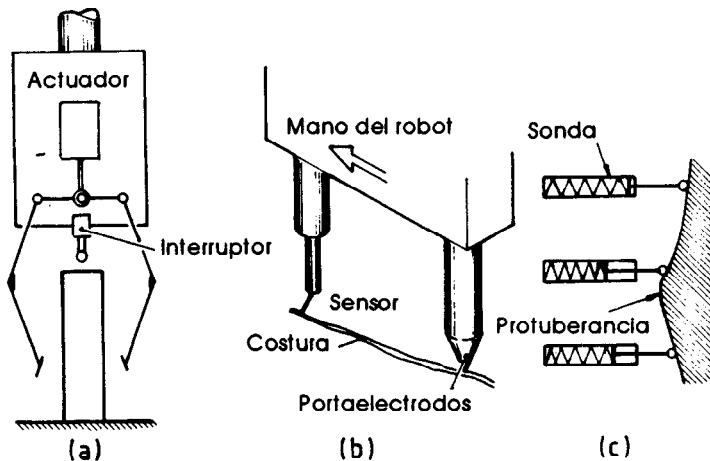
Muchas personas reconocen que el empleo de robots de segunda generación puede redundar en beneficios económicos. Sin embargo, la evolución y aplicación han sido lentos y esto se ha debido, tal vez, a una combinación de factores, incluyendo la complejidad de la tecnología y la natural renuencia de los industriales a ser los primeros en el campo (Pugh, 1983). En la actualidad las aplicaciones crecen mucho más rápidamente y

muchos paquetes de visión artificial y una gran variedad de sensores se encuentran ahora disponibles en el mercado.

Una vez equipados los robots con sentidos parecidos a los humanos, y habiendo incorporado a éstos una amplia variedad de características antropomorfas, resulta natural preguntar si es posible ir un paso más adelante y enseñar a los robots a pensar como humanos. Es muy probable que esta cuestión genere siempre un acalorado debate, dado que, en general, los humanos sienten desagrado y temor por las máquinas que aparentan tener un comportamiento inteligente. A pesar de ello, la tercera generación de robots contará con inteligencia artificial; serán capaces de actuar en una forma racional; serán capaces de entender y responder en un lenguaje natural; podrán resolver problemas complicados en áreas que normalmente requieren la participación de un experto humano. Pero antes de analizar en mayor detalle los alcances de la inteligencia artificial, es necesario echar un vistazo a los sensores utilizados en la robótica.

## 8.2 Tacto y detección táctil

Como primer punto es necesario establecer una distinción entre tacto y detección táctil. De acuerdo con los principios definidos por L. D. Harmon, es posible notar que la detección táctil comprende la medición constante de fuerzas en una distribución dada (Stauffer, 1983; Harmon, 1983). Utiliza propiedades similares a las de la piel. El tacto, por otro lado, se refiere al simple contacto para detectar una fuerza en uno o en solamente unos cuantos puntos.



**Figura 8.1** Detección por tacto: (a) uso de un microinterruptor, (b) medidor para guiar un portaelectrodos de soldadura, (c) detección de imperfecciones.

En la figura 8.1 se muestran tres ejemplos de detección por tacto. El primero (figura 8.1(a)) es normal en muchas aplicaciones en las que el robot sólo necesita información de que ha sujetado un objeto o de que se encuentra en la posición correcta para iniciar la acción de sujeción. Como se muestra, un sencillo microinterruptor es con frecuencia adecuado, aunque si los artículos son delicados es posible que sea necesario utilizar un interruptor activado por contacto puntual o incluso realizar un cambio a una detección sin contacto (véase a continuación).

Los sistemas de soldadura robotizados requieren sistemas de seguimiento de la unión que permitan al robot detectar y corregir desviaciones a partir de la ruta de soldadura deseada. Más adelante se verá cómo se ha utilizado la visión artificial para resolver este problema, pero en esta sección se hace referencia a una solución que depende de la detección táctil (figura 8.1(b)). El sensor consiste en un detector con forma de aguja que está colocado aproximadamente 3 cm adelante del portaelectrodos de soldadura (Presern y colaboradores, 1981). La aguja tiene dos grados de libertad con un desplazamiento máximo de  $\pm 10$  mm. Se utilizan sensores ópticos para convertir el desplazamiento de la aguja en una señal digital que se utiliza para guiar el portaelectrodos de soldadura. Se asegura que cuenta con una resolución de 0.05 cm. Este sistema evita la necesidad de realizar dos pasadas sobre la unión de soldadura, una para enseñar y la otra para soldar. De esta forma la operación se lleva a cabo con mayor rapidez y no se requiere almacenar en la computadora información relativa a la unión.

Otro ejemplo de detección por tacto se muestra en la figura 8.1(c). En este caso, se conectan potenciómetros en miniatura a sondas pretensadas con resorte para determinar en forma general el borde externo de un componente. Este método se ha extendido (Abele, 1981) a la determinación del tamaño de las rebabas durante operaciones de acondicionamiento de partes fundidas; la información se usa para calcular la ruta ideal que debe seguir la esmeriladora.

La detección por tacto da información en bruto sobre el contacto con un objeto. La detección táctil, por otra parte, permite determinar la distribución de las fuerzas de contacto para calcular la magnitud y la dirección de la fuerza bruta de contacto. Además, y tal vez más importante aún, el conocimiento de la distribución de las fuerzas de contacto puede usarse para identificar el objeto y éste es un aspecto importante de la inteligencia artificial. Los sistemas prácticos utilizan una piel artificial que consiste en arreglos de elementos sensores de fuerza, o "unidades táctiles", instalados en los dedos de un efector final. Existen diversos sensores táctiles disponibles en forma comercial (Allan, 1983).

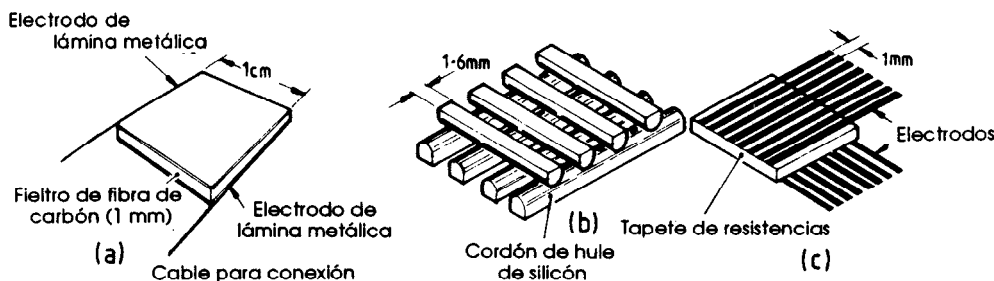
Harmon (1983) ha llevado a cabo un estudio exhaustivo de los sensores táctiles en el cual enumera las siguientes como características deseables:

- La superficie del sensor debe ser flexible y durable.
- La resolución espacial deberá ser de aproximadamente 1 a 2 mm.
- Un intervalo de 50 a 200 unidades táctiles sería aceptable.
- Los sensores deben ser estables, monótonos y repetibles con una histéresis reducida.
- Los elementos deberán tener tiempos de respuesta de 1 a 10 ms.
- El alcance dinámico deberá ser de 1000:1 con un umbral de sensibilidad de aproximadamente  $0.01 \text{ N/m}^2$ .

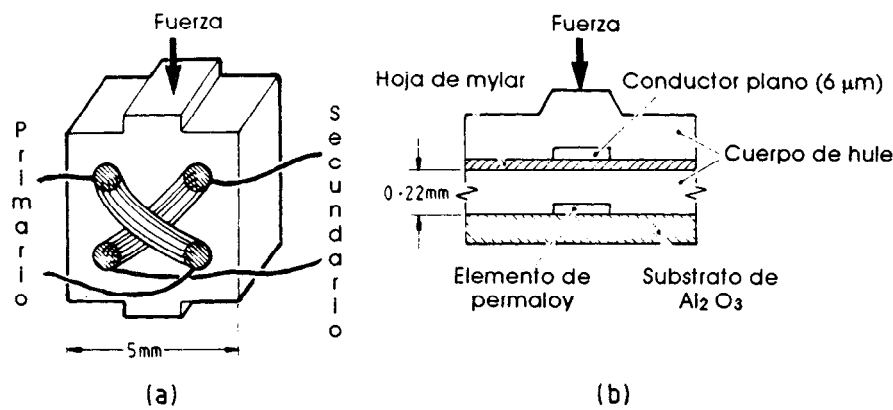
Uno de los primeros elementos táctiles (Larcombe, 1981) dependía del cambio en la resistencia de un fieltro de fibra de carbono. El aumento de la presión (figura 8.2(a)) hace que las fibras entren en un contacto más estrecho, con lo que se reduce la resistencia eléctrica entre los electrodos. Como el fieltro es flexible puede moldearse de acuerdo con la superficie de la tenaza.

Otra técnica que promete mucho (Purbrick, 1981) utiliza la variación de una resistencia en la interfase entre cuerdas de hule de silicón ortogonales (figura 8.2(b)). En el estado no tensionado, el área de contacto entre las cuerdas es reducida y, por lo tanto, la resistencia entre los electrodos es elevada. La aplicación de una presión incrementa el área de contacto y reduce la resistencia. Ha sido posible operar con éxito una matriz de  $16 \times 16$ , en la que los 256 sensores o unidades táctiles individuales se controlan en forma automática con una combinación de circuitos analógicos y digitales.

Algunos investigadores han rechazado los materiales ahulados debido a su supuesta fragilidad, histéresis y falta de homogeneidad; la falta de homogeneidad adquiere mayor importancia conforme se reduce el tamaño de la unidad táctil. Lo anterior conduce a la invención (Robertson y Walkden, 1983) de sensores que utilizan un material piezorresistivo espe-



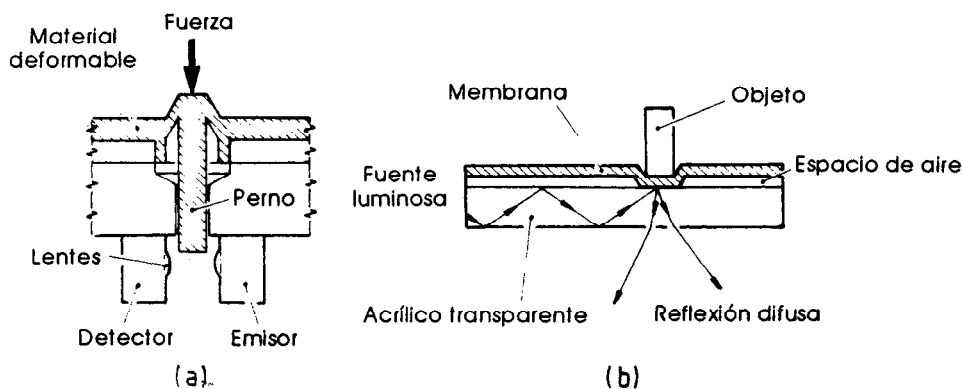
**Figura 8.2** Elementos de la detección táctil: (a) uso de un fieltro de fibras de carbono, (b) cuerdas ortogonales de hule de silicón, (c) un arreglo de  $8 \times 8$  que utiliza un material piezorresistente.



**Figura 8.3** Elementos táctiles que utilizan efectos magnéticos: (a) un transformador-presductor de presión, (b) uso de un material magnetorresistivo.

cialmente diseñado y fabricado a base de una fina trama impregnada de un medio conductor. Como en el caso del fieltro de carbono y el hule, la resistencia a través del dispositivo disminuye con la presión. En la figura 8.2(c) se muestra la distribución de un arreglo de  $8 \times 8$  con los electrodos colocados con una separación de 1 mm. En la actualidad, está en investigación un arreglo de  $16 \times 16$  con la capacidad para producir imágenes de presión para el reconocimiento de objetos. Este arreglo se usa en conjunción con un robot de enlaces en paralelo similar al ilustrado en la figura 2.10.

Finalmente, bajo la categoría de materiales piezorresistivos, es interesante hacer notar el diseño de un chip sensor VLSI de estado sólido (Raibert y Tanner, 1982). Las fuerzas se transducen utilizando un plástico



**Figura 8.4** Elementos táctiles que utilizan efectos ópticos: (a) interrupciones mecánicas de un rayo de luz, (b) uso de reflexiones difusas.

conductor, pero la característica más sobresaliente es un substrato activo que maneja las funciones necesarias de cómputo y comunicaciones. Un grupo de procesadores en el sensor lleva a cabo las operaciones de filtrado y convolución (véase la sección 8.6) en la imagen táctil. Se han llevado a cabo investigaciones con un arreglo de  $6 \times 3$  con unidades táctiles de 1 mm cuadrado, pero se tienen planes para un arreglo de  $30 \times 30$ .

Los sensores táctiles que se han analizado hasta ahora dependen de un cambio en la resistencia debido a un aumento en la presión. Se examinarán ahora sensores que utilizan efectos magnéticos. En la figura 8.3(a) se ilustra un elemento táctil fabricado de un metal magnetorrestrictivo con aleación de níquel (Chechinski y Agrawal, 1983). Un material magnético es magnetorrestrictivo si muestra un cambio en su campo B cuando se somete a fuerzas externas. El sensor, que se conoce como transformador-presductor, tiene 7 mm de altura, 5 mm de ancho y 3.5 mm de espesor. Los devanados primario y secundario son ortogonales y tienen 10 vueltas cada uno. La aplicación de una fuerza provoca un cambio en el vector de inducción y esto, a su vez, modifica el potencial secundario. Se han llevado a cabo pruebas con un máximo de hasta 1 N y los resultados han demostrado una relación lineal entre el potencial secundario y la fuerza, con muy poca histéresis.

Un avance más reciente (Vranish, 1984) utiliza un efecto magnético diferente, denominado magnetorresistencia. Los materiales magnetorresistivos como el *Permalloy* (81/19 NiFe) muestran cambios en su resistencia cuando se encuentran bajo la influencia de campos magnéticos. Este efecto es aprovechado en el sensor que se muestra en la figura 8.3(b). Se ha construido una piel a base de un arreglo magnetorresistivo de una delgada película con elementos sensores cubiertos por una capa de hule y una línea de alambres planos encapsulados en una película de mylar. Las unidades táctiles están espaciadas a intervalos de 2.5 mm, por lo que un arreglo de  $8 \times 8$  requiere un área de 25 mm cuadrados. El espesor puede ser tan reducido como 2.5 mm. La fuerza aplicada reduce la distancia entre el conductor y el elemento de permalloy y el cambio resultante en el campo magnético en el elemento hace que cambie su resistencia. Los umbrales de presión pueden ser tan reducidos como  $30 \text{ N/m}^2$  o tan elevados como  $2 \text{ MN/m}^2$ , dependiendo del espesor de la capa externa de hule.

Existen además varios sensores táctiles que utilizan efectos ópticos. El sensor de la figura 8.4(a) utiliza un deflector mecánico y un transductor electro-óptico (Rebman y Morris, 1983). Los movimientos del perno, que está integrado al material flexible de la superficie, afectan la cantidad de luz que pasa entre un LED y un fototransistor. La corriente resultante es una medida de la fuerza aplicada. Se dispone de manera comercial de un arreglo de  $8 \times 8$  con un área de 81 mm cuadrados que permite medir fuerzas de hasta 4 N.

Otra forma de utilizar los efectos ópticos en un sensor táctil se ilustra en la figura 8.4(b). El sensor utiliza las propiedades de reflexión entre objetos con distintos índices de refracción. El transductor (Mott y colaboradores, 1984) consiste en una fuente luminosa y una placa de acrílico transparente separada de una membrana flexible por un espacio de aire. Como el índice de refracción del acrílico es mayor que el del aire, un haz luminoso dirigido sobre el borde de la placa se reflejará internamente y saldrá por el extremo del lado derecho. Sin embargo, si se aplica una presión sobre la membrana, ésta entrará en contacto con el acrílico y se producirán reflexiones difusas debido a que el índice de refracción de la membrana es mayor que el del acrílico. La luz escapará en forma lateral, siendo proporcional la intensidad del parche brillante a la presión aplicada. Esta luz puede detectarse con una cámara (Mott y colaboradores, 1984) o con un arreglo de fototransistores (Tanil y colaboradores, 1984). Se ha aseverado (Mott y colaboradores, 1984) que la resolución de un sensor táctil de esta forma se puede equiparar a la de sensores de visión de alta resolución (véase a continuación), por lo general de  $256 \times 256$  unidades táctiles en un cojín de 2 centímetros cuadrados.

### ***Detección de deslizamiento***

Cuando un robot o una prótesis manual tiene que levantar objetos frágiles es importante utilizar la menor fuerza de sujeción posible. La fuerza mínima de sujeción es aquella que provee suficiente fricción para evitar que el objeto se deslice. Existen varias formas de detectar el deslizamiento. Se han usado micrófonos interconstruidos en prótesis manuales para detectar el deslizamiento por medio del ruido que éste produce (Swain, 1982). Otro método consiste en un rodillo interconstruido en unas tenazas de robot que entra en contacto con la parte por levantar (Masuda y Hasegawa, 1981). El deslizamiento provoca la rotación del rodillo que se detecta con sensores fotoeléctricos. Debe hacerse notar que todos los sensores táctiles antes mencionados también tienen la capacidad de detectar el deslizamiento, dado que si llega a ocurrir un deslizamiento, la imagen táctil cambia, y esto podría utilizarse para indicar que ha sucedido un deslizamiento.

## **8.3 Medición de fuerzas y pares totales**

La detección táctil puede proporcionar información sobre la posición de un objeto, sobre su deslizamiento y, si la resolución es lo suficientemente alta, sobre la forma del objeto. La detección táctil está relacionada básicamente con las fuerzas de reacción entre las tenazas y el objeto. La detección de fuerzas, por otro lado, provee información sobre las fuerzas de reacción entre el objeto y el ambiente externo. Su principal área de aplicación es en el ensamble mecánico. Por ejemplo, al colocar una clavija en un

orificio, el sistema de control del robot utiliza información sobre la fuerza para ajustar la posición y orientación de la clavija hasta que las fuerzas de reacción se reducen al mínimo. Esto se conoce como deformabilidad activa, en contraste con la deformabilidad de un centro remoto que se mencionó en el capítulo 2. Los teleoperadores con retorno de fuerzas, como los descritos en el capítulo 10, proveen otra área de aplicación.

Con el fin de lograr un control activo, es necesario conocer el vector de fuerza generalizado; para esto, la fuerza desconocida entre el efector final y el medio ambiente se descompone en tres fuerzas individuales,  $F_x$ ,  $F_y$  y  $F_z$  sobre los ejes ortogonales y en tres momentos independientes  $M_x$ ,  $M_y$  y  $M_z$  con respecto de dichos ejes. Existen varias formas para llevar a cabo esta descomposición.

### ***Por la medición de las fuerzas y pares en cada coordenada de máquina***

Si las fuerzas y pares se pueden medir en cada actuador, entonces es posible deducir la fuerza generalizada en las tenazas (Nevins y colaboradores, 1974).

Supóngase que el vector  $dX$  es un pequeño movimiento de las tenazas, expresado en coordenadas reales, el vector  $d\Theta$  las coordenadas de máquina correspondientes y  $J$  el Jacobiano. Entonces, si el brazo es lo suficientemente rígido se puede escribir

$$dX = Jd\Theta \quad (8.1)$$

Si estos desplazamientos son el resultado de una fuerza generalizada  $F$  aplicada a la mano y si no existen pérdidas de energía, entonces la ecuación (5.1) permite escribir

$$F^T dX = F^T d\Theta = T^T d\Theta + W^T d\Theta \quad (8.2)$$

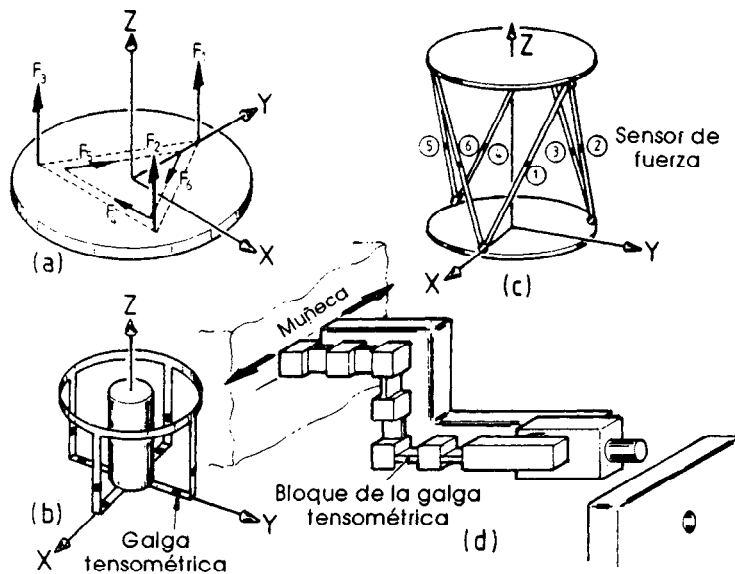
en donde  $T$  es el vector de fuerzas y pares en las articulaciones y  $W$  es el vector de pares inducidos por la gravedad. Por lo tanto

$$F^T = T^T J^{-1} + W^T J^{-1} \quad (8.3)$$

Este es el resultado deseado que muestra cómo la fuerza generalizada puede determinarse a partir de las fuerzas, los pares en las articulaciones y los pares de gravedad.

Una de las principales limitaciones de este método es la dificultad para medir los pares en la articulación con la suficiente precisión debido a su contaminación por los efectos de la fricción.





**Figura 8.5** Mediciones de fuerzas y pares totales: (a) un soporte medidor de impulso con seis componentes, (b) pedestal sensor de fuerza, (c) sensor de fuerza para montaje en una muñeca, (d) sensor montado directamente en unas tenazas.

### Por el uso de pedestales sensores de fuerzas

Las fuerzas de interacción entre un objeto sostenido por un robot y el piso pueden determinarse a partir de mediciones tomadas en un pedestal de fuerza fijo en el piso. Estos pedestales se han usado desde hace mucho tiempo para la medición de fuerzas y momentos desconocidos en modelos de túneles de viento, máquinas herramienta y motores de cohetes. En la figura 8.5(a) se muestra un soporte medidor de impulso con seis componentes usado en pruebas de motores de cohetes (Doebelin, 1983). Se utilizan seis celdas de carga, tres fuerzas de medición  $F_4$ ,  $F_5$  y  $F_6$  sobre los lados de un triángulo equilátero en el plano  $XY$  y tres fuerzas de medición  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$  en la dirección vertical  $Z$ . El motor de prueba se acopla al centro común de ambos triángulos. Los componentes del vector de fuerza generalizada son

$$\left. \begin{aligned} F_x &= 0.5(F_5 + F_6) - F_4 \\ F_y &= (\sqrt{3}/2) (F_5 - F_6) \\ F_z &= F_1 + F_2 + F_3 \\ M_x &= (0.5l / \sqrt{3}) (2F_1 - F_2 - F_3) \\ M_y &= 0.5l (F_3 - F_2) \\ M_z &= -(0.5L / \sqrt{3}) (F_4 + F_5 + F_6) \end{aligned} \right\} \quad (8.4)$$

en donde  $I$  y  $L$  son los lados de los triángulos equiláteros de mayor y menor tamaño, respectivamente.

El dispositivo que se muestra en la figura 8.5(a) se utilizó por primera vez en 1960. Desde entonces se han inventado otros sensores de fuerza de pedestal, algunos especialmente para aplicaciones de operaciones de ensamble por medio de robots (Nevins y colaboradores, 1974). Un ejemplo, utilizado en conjunción con un robot para selección y colocación, se muestra en la figura 8.5(b). El sensor consiste en un marco de ocho varillas de acero inoxidable, cada una de las cuales tiene una galga tensométrica semiconductor (Kasai y colaboradores, 1981). Al conocer la tensión sobre cada galga es posible determinar la fuerza generalizada. Se asegura haber obtenido una sensibilidad de pares de  $2 \times 10^{-3}$  Nm y una sensibilidad de fuerza de  $2 \times 10^{-2}$  N. Cuando el robot está insertando un componente, el pedestal mide las fuerzas y los pares y, de acuerdo con las mediciones, el controlador inclina o mueve la mesa en forma lateral para lograr la alineación correcta.

### *Por la instalación de un sensor de fuerza generalizada en el robot*

Cuando un robot se ha diseñado para llevar a cabo labores generales de ensamble, es mucho lo que puede ganarse si se incorpora un sensor de fuerza generalizada como parte integral del robot. El dispositivo mostrado en la figura 8.5(c) se ha acoplado entre la muñeca del robot y el efector final; el efector final está acoplado, a su vez, a la placa inferior y la muñeca a la placa superior (Gaillet y Reboulet, 1983). La forma geométrica es similar a la del accionador en paralelo de la figura 2.10, pero en este caso los seis eslabones tienen una longitud fija y cada uno de ellos cuenta con un sensor de fuerza.

Si las placas tienen radios  $R$  iguales, la distancia vertical entre las placas es  $h$  y la longitud del eslabón es  $L$ , entonces la relación entre la fuerza generalizada y las fuerzas medidas  $F_1$  a  $F_6$  es

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & 2a & -a & -a & 2a & -a \\ 2\sqrt{3}a & 0 & -\sqrt{3}a & \sqrt{3}a & 0 & -\sqrt{3}a \\ b & b & b & b & b & b \\ 0 & -\sqrt{3}ha & -\sqrt{3}ha & \sqrt{3}ha & \sqrt{3}ha & 0 \\ 2ha & -ha & -ha & -ha & -ha & 2ha \\ -\sqrt{3}aR & \sqrt{3}aR & -\sqrt{3}aR & \sqrt{2}aR & -\sqrt{3}aR & \sqrt{2}aR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} \quad (8.5)$$

en donde  $a = R/2L$  y  $b = h/L$ .

Lo anterior es mucho más complicado que las transformaciones requeridas para el pedestal triangular para detección de fuerza modelado por la ecuación (8.4). En el último caso, la determinación de un componente del vector de fuerza generalizada requería un cálculo que incluía cuando mucho tres de las fuerzas medidas. En este caso, cuatro de los componentes del vector incluyen las seis fuerzas medidas para su cálculo. Aun cuando reconocen este fuerte acoplamiento cruzado, Gaillet y Reboulet (1983) dicen que esta limitación se ve más que compensada por lo compacto del sensor, por su capacidad para registrar los efectos de la temperatura, por la facilidad para ajustarlo y por la ausencia de los numerosos términos de corrección que se presentan en otros sensores.

La instalación de un sensor de fuerza entre la muñeca y el efector final puede no ser por completo satisfactoria si el efector final es en particular grande; el peso del efector final puede absorber la mayor parte del alcance dinámico del sensor. La solución es entonces montar el sensor directamente sobre las tenazas, como se muestra en la figura 8.5(d). Aquí se utilizan seis sensores modulares intercambiables (Wang y Will, 1978); cada uno consiste de una varilla flexible con una galga tensométrica acoplada. La ortogonalidad de la estructura resulta en una considerable reducción del tamaño y de la complejidad de la matriz de transformación.

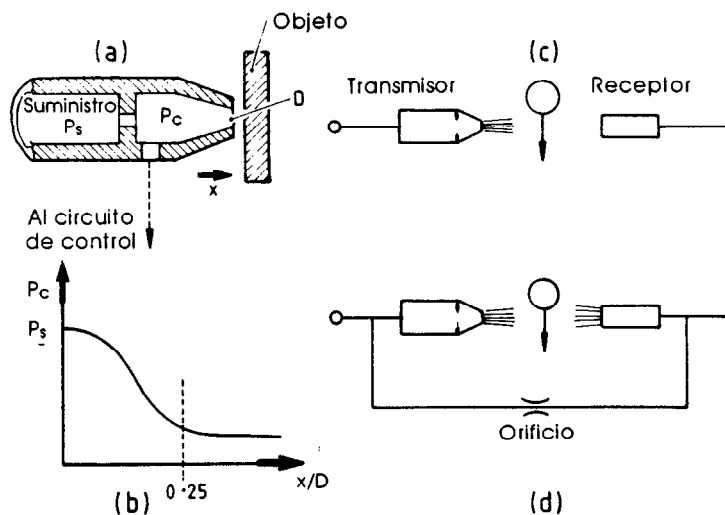
#### **8.4 Detección de proximidad usando sensores sin contacto**

Una vez analizados aquellos aspectos de detección del robot que se relacionan con el sentido humano del tacto, la atención se enfocará a la detección sin un contacto físico. En forma inicial se considerarán los sensores de proximidad cuya función primaria es determinar si un objeto o parte de un objeto se encuentra a una distancia determinada del efector final del robot. Se mostró con anterioridad que los sensores táctiles más sencillos se usan para determinar si un objeto se ha sujetado o si se encuentra en la posición correcta para sujetarse. Los sensores sin contacto tienen dos importantes ventajas con respecto a los sensores táctiles: no dañan el objeto detectado y, al no estar sujetos a contactos repetidos, tienen una mayor duración.

Muchos son los efectos físicos que se utilizan en los sensores de proximidad sin contacto; los más comunes son los neumáticos, acústicos, magnéticos, eléctricos y ópticos.

##### ***Interruptores neumáticos para detección de proximidad***

Los sensores neumáticos son de dos tipos: sensores de presión y de chorro de aire interrumpible (McCloy y Martin, 1983). El primero de ellos, que incluye calibradores de aire, ha estado en uso desde hace ya varios años. Su principio de funcionamiento se ilustra en la figura 8.6(a) en donde se



**Figura 8.6** Detectores de proximidad neumáticos: (a) sensor de presión posterior (boquilla de aletas), (b) variación de la presión con la distancia al objeto, (c) un chorro de aire bloqueable, (d) chorro de aire bloqueable con presión condicionada en el receptor.

muestra un medidor en forma de tubo en el cual una presión fija de entrada  $P_s$ , está conectada por medio de un orificio fijo a una cámara de control a una presión  $P_c$ . La magnitud de  $P_c$  depende del tamaño del orificio variable formado por el extremo del tubo y el objeto cuya distancia o presencia debe detectarse.

Entre más cercano esté el objeto, menor será la cantidad de aire que escape y mayor será la presión  $P_c$ . Cuando el área de escape es menor que la del orificio de salida, es decir, cuando  $x < 0.25D$ , la presión  $P_c$  varía de manera proporcional con la distancia  $x$  (figura 8.6(b)). Así, además de poder detectar la presencia de un objeto, el sensor puede utilizarse para medir distancias dentro de esta región. Los problemas de pérdida de aire y sensibilidad a corrientes dispersas generalmente restringen el diámetro  $D$  a un máximo de alrededor de 4 mm, de manera que el intervalo dinámico es restringido a cerca de 1 mm en la mayoría de las aplicaciones (Belforte y colaboradores, 1981).

El chorro de aire interrumpible (figura 8.6(c)) es otra forma de sensor neumático de proximidad. Es el equivalente neumático del fotoemisor y receptor (véase a continuación) por lo que en ocasiones se denomina ojo neumático. En la figura 8.6(c) se ilustra su principio de operación. Una fuente de baja presión transmite un chorro de aire a través de un espacio libre hacia un orificio receptor en donde se recupera algo de esta presión. Si algún objeto interrumpe el chorro de aire, la presión en el receptor

disminuye y el cambio en la señal puede usarse para indicar la presencia del objeto. Los chorros comunes tienen diámetros de alrededor de 3 mm en el transmisor, 6 mm en el receptor, espacios libres de 25 a 50 mm y suministran presiones de 0.07 a 0.2 bars (McCloy y Martin, 1983). En ambientes con gran cantidad de polvo, como pueden ser molinos de harina o cementeras, la posibilidad de que se obstruya el receptor puede reducirse presurizándolo como se muestra en la figura 8.6(d).

Aun cuando sería posible detectar objetos instalando un sensor de chorro de aire interrumpible en las pinzas de las tenazas del robot, la sensibilidad a corrientes dispersas podría provocar problemas durante el movimiento del robot. La inspección e identificación de partes son las áreas de aplicación donde existen mayores probabilidades de éxito, aunque tampoco en este caso puede ignorarse la pérdida de potencia debida al aire que escapa.

### ***Detectores acústicos de proximidad***

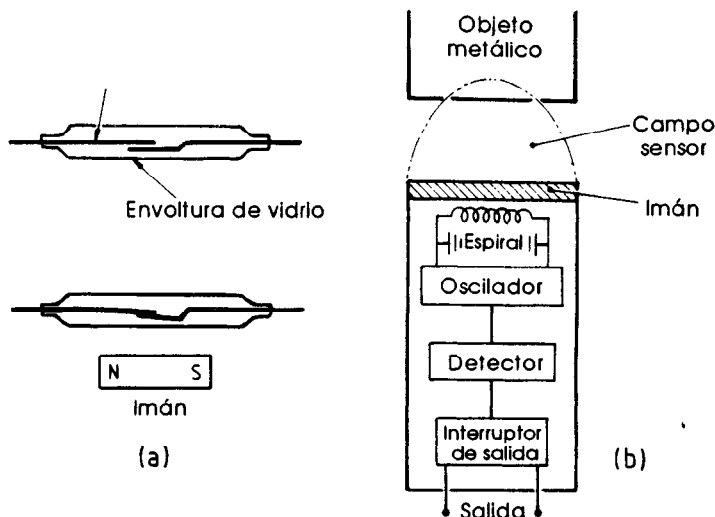
Los efectos del eco pueden emplearse para detectar la proximidad de un objeto, aunque es probable que la principal área de aplicación dentro de la robótica sea la determinación de rangos (véase la sección 8.5). El principal elemento de este tipo de sensor es un generador ultrasónico, que con frecuencia se basa en la resonancia de un piezocristal. La necesidad de contar con un haz angosto obliga al uso del ultrasonido ( $>20$  kHz). El sensor acústico depende de la reflexión del haz desde el objeto; la detección de la señal acústica reflejada indicará la presencia del objeto. En algunos sensores se emplea el mismo transductor tanto para la transmisión como para la detección.

Los sensores acústicos de proximidad pueden detectar objetos dentro de un intervalo aproximado de 5 a 100 cm. Algunos autores (Luo y colaboradores, 1983) aseguran que su volumen grande evita la posibilidad de que estos sensores se instalen en las tenazas de un robot.

### ***Detectores magnéticos-eléctricos de proximidad***

La forma más sencilla de un sensor magnético de proximidad sin contacto es el interruptor de laminillas secas. Dos laminillas delgadas o lengüetas de material magnético se encapsulan en una envoltura de cristal con conexiones externas a un circuito eléctrico. Lo normal es que las laminillas estén separadas, por lo que el circuito permanece abierto, pero si el sensor ingresa en un campo magnético, las laminillas se atraen una a otra y establecen un contacto eléctrico (figura 8.7(a)).

Otro tipo de sensor sin contacto, el interruptor inductivo por proximidad, funciona por medio de las corrientes inducidas en un objeto. En la figura 8.7(b) se muestran los elementos básicos de este interruptor. Una bobina de alambre se amolda a la superficie sensora y forma parte de un



**Figura 8.7** Detección de proximidad por medios magnéticos y eléctricos:  
 (a) interruptor de laminillas secas, abierto y cerrado, (b) interruptor de proximidad inductiva.

circuito oscilador de alta frecuencia. El campo magnético oscilatorio que existe alrededor de esta bobina induce corrientes parásitas en cualquier objetivo que ingrese al campo y, el efecto resultante sobre la amplitud de las oscilaciones se puede usar para operar un interruptor de salida (Kay, 1983; Luo y colaboradores, 1983). Este sensor puede detectar objetos metálicos que se aproximen desde cualquier dirección. La sensibilidad es mayor cuando los objetivos están contruidos de algún material ferroso, reduciéndose las distancias de detección a aproximadamente la mitad para el caso de objetivos no ferrosos. Cuando los objetivos no son conductores de electricidad, se ha descubierto que es suficiente con colocar una cinta autoadherible de papel aluminio en la superficie para lograr un funcionamiento adecuado. La mayoría de los interruptores están encapsulados por completo y son de forma cilíndrica, con diámetros que varían entre 2 y 60 mm. Los rangos de detección se ubican por lo general entre 0.25 y 40 mm.

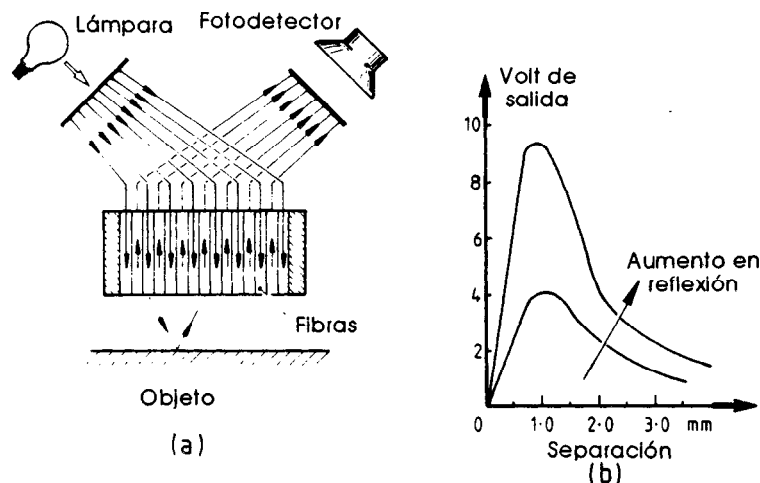
Los sensores de proximidad por capacitancia aprovechan los cambios en la capacitancia entre un objeto y la cabeza sensora. Estos sensores son muy parecidos a los del tipo inductivo, pero con una diferencia importante: la parte activa del sensor capacitivo es una capa de placas metálicas montadas en la parte posterior de la superficie sensora. Las placas forman parte del elemento capacitivo de un oscilador. Cuando algún objeto está dentro del intervalo de detección del sensor, un cambio en la forma y en las características dieléctricas hacen que cambie la capacitancia, con lo que se altera el oscilador y se suministra una señal al interruptor.

Mientras que el sensor inductivo de proximidad sólo es afectado por objetivos conductores, el sensor capacitivo tiene la ventaja de reaccionar con la mayoría de los materiales inclusive plásticos, madera y vidrio. Tanto el tamaño como el intervalo dinámico de los sensores capacitivos son muy similares a los de tipo inductivo.

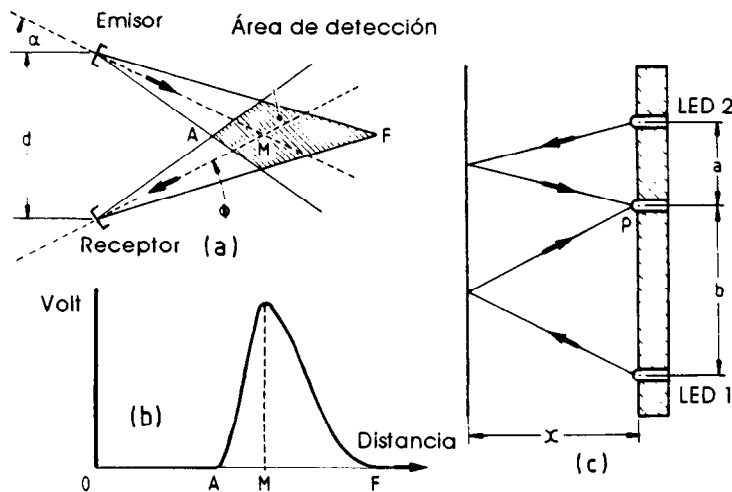
### Detectores ópticos de proximidad

Los métodos ópticos para el monitoreo y la medición sin contacto presentan varias ventajas frente a otros métodos, en particular en cuanto a su seguridad inherente por lo que respecta a riesgos eléctricos o de incendio. Los dispositivos más simples utilizan la cantidad de luz reflejada desde un objetivo como una medida de la distancia. Uno de los primeros sensores comerciales, el sensor Fotonic (Menadier y colaboradores, 1967), utilizaba fibras ópticas para medir los desplazamientos en un intervalo desde los micrómetros hasta los milímetros (figura 8.8(a)). La luz se transmite al objetivo por medio de un paquete de fibras ópticas y el objetivo refleja una cierta cantidad de luz hacia fibras receptoras que la transmiten hacia un fotodetector. El diámetro de las sondas varía de 0.5 a 7.5 mm; éstas consisten en un grupo de fibras ópticas cada una de las cuales tiene un diámetro cercano a un décimo de milímetro. Una variación normal del potencial de salida con respecto a la distancia a la que se encuentra el objetivo se ilustra en la figura 8.8(b).

Existen dos intervalos de medición útiles, el de pendiente frontal y el de pendiente trasera, pero por lo general se prefiere la pendiente frontal dado que es más sensible y más lineal.



**Figura 8.8** El Sensor Fotonic: (a) configuración general, (b) salida como función de la distancia al objetivo y del índice de reflexión de la superficie.



**Figura 8.9** Detectores de proximidad ópticos: (a) la luz infrarroja se refleja desde un objetivo en el área de detección, (b) salida del receptor como función de la distancia del objetivo, (c) un detector óptico que utiliza el tiempo de vuelo.

En la actualidad es muy común el uso de diodos emisores de luz (LED) infrarrojos para la detección de proximidad. Su uso reduce la posibilidad de interferencia por parte de la luz ambiental. Un sensor que se usa con frecuencia emplea un LED como emisor y un fototransistor como receptor (figura 8.9(a)). La luz infrarroja (con una longitud de onda de 900 nm) se dirige hacia un objetivo y la intensidad de la luz reflejada, según la percibe el fototransistor, es una función de la distancia al objetivo (Espiau y Catros, 1980). Los haces luminosos son coplanares, están inclinados en forma simétrica a un ángulo  $\alpha$  y el emisor y el receptor están separados por una distancia  $d$ . En la práctica el sensor produce un volumen sensible con forma de cigarro, que está enfocado de manera permanente a unos cuantos centímetros del sensor. Cuando un objeto reflejante ingresa a este volumen, la salida de potencial resultante en el fototransistor es una función no lineal de la distancia al objetivo. En la figura 8.9(b) se muestra una variación característica en la salida cuando el plano objetivo es ortogonal al plano del sensor. Las distancias  $OA$ ,  $OM$  y  $OF$  se obtienen de

$$\begin{aligned} OA &= (d/2) \tan (\alpha + \phi) \\ OM &= (d/2) \tan \alpha \\ OF &= (d/2) \tan (\alpha - \phi) \end{aligned} \quad (8.6)$$

en donde  $\phi$  es la amplitud del haz, determinada por la óptica. Puede apreciarse que la precisión y el rango dependen de los valores de  $d$  y  $\alpha$ . Por



ejemplo, un valor muy grande de  $d$  y un valor reducido de  $\alpha$  resultan en un sensor con un rango amplio y poca precisión.

En la figura 8.9(b) se muestra que la salida es igual a dos distancias distintas. Esto puede resultar confuso, pero el problema puede evitarse mediante el atraso hacia adentro del sensor de manera que se utilice sólo la pendiente posterior de la característica (Bejczy, 1980). Un problema posiblemente más serio se deriva de los efectos de la orientación de la superficie y la reflectividad, pero a pesar de estas dificultades se han hecho varios intentos que han dado buenos resultados en la integración de estos sensores como parte de la estructura de un efector final. Espiau y Catros (1980) describen su uso en la "mano inteligente" de un dispositivo operado a distancia para un tetrapléjico (véase el capítulo 9) y Bejczy (1980) ilustra su aplicación en un teleoperador espacial.

Los dos dispositivos ópticos antes descritos dependen de variaciones en la intensidad de la luz reflejada. Su rendimiento está, por lo tanto, afectado por cualquier variación en la reflexión de los objetos detectados. En aquellos casos en los que es posible que existan grandes variaciones, el empleo de información sobre el "tiempo de vuelo" brinda una mejor solución. Al conocer la velocidad de la luz  $c$  y el tiempo  $t$  que un rayo de luz requiere para ir de un transmisor a un receptor, resulta fácil determinar la longitud  $L$  del desplazamiento mediante la fórmula  $L = ct$ . Este atraso en tiempo, o defasamiento, que es el mismo efecto pero disfrazado, puede usarse para medir la distancia. Trounov (1984) describe un sensor de distancia que utiliza el cambio de fase entre dos rayos luminosos para medir una distancia. Dos diodos emisores de luz se colocan en forma asimétrica con respecto a un fototransistor  $P$  (figura 8.9(c)). El LED 1 se modula con  $\sin \omega t$  y el LED 2 con  $\cos \omega t$ . El cambio de fase  $\psi$  entre los haces luminosos que llegan al fototransistor se obtiene de

$$\psi = (\pi/4) - (\omega/2c) \left\{ \sqrt{4x^2 + a^2} - \sqrt{4x^2 + b^2} \right\} \quad (8.7)$$

Se ha asegurado que el dispositivo puede detectar dentro de un intervalo de 5 a 70 mm con una precisión de  $\pm 1$  mm. Las dimensiones  $a$  y  $b$  son de 30 mm y 10 mm, respectivamente, y el tiempo total requerido para el procesamiento es de 5.3 ms.

### 8.5 Determinación de rangos

Los sensores de proximidad sin contacto pueden detectar objetos o medir la distancia hasta un objeto dentro de un intervalo restringido, por lo general de milímetros a centímetros. Cuando las distancias son mayores, metros o kilómetros, es necesario utilizar sensores de intervalo. Estos dispositivos se basan en la transmisión de haces ultrasónicos o haces luminosos.

### ***Sensores de alcance ultrasónico***

Se indicó anteriormente en la sección 8.4 que pueden emplearse sensores ultrasónicos para detectar la proximidad dentro de un intervalo de 5 a 100 cm, pero su principal área de aplicación es en la determinación de alcances. Los sensores acústicos deducen la distancia del objetivo a partir de una medición del retardo en el eco de un pulso ultrasónico. Se han utilizado en el sistema de enfoque automático de una cámara muy popular (Polaroid, 1980). Los detectores de alcance acústicos más simples utilizan un sistema de una sola frecuencia, pero dado que el determinador de alcance de una cámara debe trabajar con objetivos con formas geométricas variables e impredecibles, resulta necesario utilizar cuatro frecuencias diferentes para asegurar que se genere un eco confiable. La señal transmitida consiste en 8 ciclos de 60 kHz, 8 ciclos de 57 kHz, 16 ciclos de 53 kHz y 24 ciclos de 50 kHz, para un total de 56 ciclos en aproximadamente 1 ms. Un transductor electrostático se usa alternativamente como transmisor y receptor. El sistema se diseñó para mediciones en un intervalo de 25 cm a 10 m con una resolución de 3 cm. Se ha modificado para utilizarlo en unas tenazas controladas por medio de sensores (Dillman, 1982). La distancia mínima medible se limitó a 18 cm debido al tiempo requerido para la transmisión y el tiempo requerido para cambiar el transductor de operar como transmisor a operar como receptor.

La determinación de alcances es un requisito esencial en los robots con movimiento. En un ejemplo (Banzil y colaboradores, 1981) la posición de un robot ambulante con respecto a obstáculos, esquinas, etc., se determina con un conjunto de 14 módulos emisores/receptores ultrasónicos instalados en el robot. Cada unidad se estimula por turnos y emite cuatro ciclos a 36 kHz; la distancia se obtiene contando el número de impulsos en un reloj de 1.536 MHz. Las distancias de alrededor de 2 cm pueden medirse con una precisión de 0.5 cm. Un robot educativo disponible en forma comercial utiliza un solo transductor, que genera ocho ciclos de 32 kHz a intervalos de 0.5 s (Heathkit, 1980).

### ***Sensores de alcance óptico***

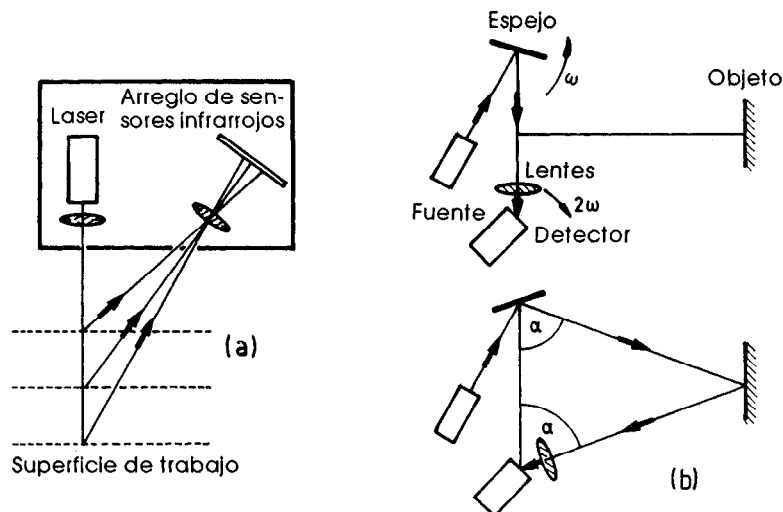
La precisión de los dispositivos acústicos con frecuencia está afectada por variaciones en la velocidad del sonido debidas a cambios en las condiciones atmosféricas. El uso de sensores ópticos permite obtener mejor precisión. Las dos técnicas usadas con mayor frecuencia son a) tiempo de vuelo o detección y estimación de distancia con luz (LIDAR) y (b) triangulación óptica.

Los sistemas de tiempo de vuelo pueden subdividirse, además, en sistemas pulsados y de onda continua. En los primeros se mide el tiempo que tarda un pulso luminoso para desplazarse de la fuente al objetivo y de

éste a la fuente. Esta técnica es útil para alcances más amplios, digamos  $>10$  m. No puede usarse para alcances menores a alrededor de 2 m, dado que con anchos mínimos prácticos del pulso de alrededor de 5 ns, el pulso se dispersa en el espacio a través de 1.5 m (la velocidad de la luz es  $3 \times 10^8$  m/s). También resultaría en extremo difícil lograr una resolución alta, por ejemplo, una resolución de 6 mm requeriría a la detección de diferencias de tiempo tan reducidas como 20 ps. Estas limitaciones restringen el uso de la técnica de tiempo de vuelo pulsada por lo menos en cuanto se refiere a los robots. El área que ofrece mayores probabilidades de aplicación parece ser la guía y el control de robots con movimiento, en donde las distancias pueden ser grandes (5-10 m) y no se requiere que la resolución sea tan precisa (Lewis y Johnson, 1977).

La técnica de tiempo de vuelo modulada de onda continua tiene mayores posibilidades. En este caso, los datos del alcance se determinan a partir de los cambios de fase entre las señales transmitida y recibida. El sistema descrito por Nitzen y colaboradores (1977) utiliza una frecuencia modulada de 9 MHz y puede medir alcances de 1 a 5 m con una resolución de 1 cm (equivalente a un defasamiento de  $0.108^\circ$ ). Un problema importante radica en el amplio intervalo dinámico ( $\approx 100$  dB) causado por las variaciones en la reflectancia del objetivo debidas a la distancia.

La triangulación geométrica es otra técnica comúnmente usada en la determinación de alcances por medios ópticos. En la figura 8.10 se muestran dos ejemplos de esta técnica. En el primero, la luz infrarroja de un



**Figura 8.10** Determinación de alcances por medios ópticos: uso de triangulación geométrica: (a) la posición del rayo reflejado en los sensores constituye una medida de la distancia, (b) uso de un espejo giratorio y lentes.

rayo laser de estado sólido se refleja desde la superficie de un objeto y pasa a través de un lente hacia una serie de sensores infrarrojos. La posición del punto de luz en la serie de sensores es una medida del rango. Un dispositivo disponible en forma comercial (Edling y Porsander, 1984) usado para seguir uniones en aplicaciones de soldadura de arco, tiene una masa de 0.65 kg, una resolución de 0.06 mm y un rango de 32 mm a lo largo de una distancia media de 170 mm.

Otro ejemplo de triangulación (figura 8.10(b)) es un paquete compacto de  $7 \times 7 \times 8$  cm (Nimrod y colaboradores, 1982). Como se muestra, un espejo transmisor, girando a una velocidad constante  $\omega$ , hace un barrido con un rayo laser en un plano a una velocidad  $2\omega$ . La distancia entre el eje del espejo y el fotodetector es la línea base  $B$ . Un lente para enfocar la luz producida gira alrededor del fotodetector a  $-2\omega$  y está sincronizado con el espejo de manera que el ángulo  $\alpha$  entre la línea base y el haz reflejado por el espejo sea siempre igual al ángulo entre la línea base y el eje óptico del lente. Cuando un objetivo se coloca en algún lugar sobre el eje de medición, se generan dos señales con el fotodetector para cada rotación del espejo. La primera ocurre cuando  $\alpha = 0$  y la segunda cuando el haz reflejado por el espejo ilumina el objetivo en su intersección con el eje de medición. El alcance  $R$  es

$$R = 0.5B \tan \alpha \quad (8.8)$$

y el ángulo  $\alpha$  se obtiene de

$$\alpha = 4\pi T_a / T_c \quad (8.9)$$

en donde  $T_a$  es el retraso de tiempo entre la primera y la segunda señal y  $T_c$  es el tiempo para el ciclo de barrido del espejo. La resolución es afectada por el alcance, la línea base y la variación en la velocidad de barrido. La precisión varía desde 0.07% de rango a 1 m hasta 0.1% a 30 mm.

### 8.6 Visión artificial

La distancia que existe entre la determinación de alcances por medios ópticos y la visión artificial y de ésta a la inteligencia artificial, es muy corta. En la delimitación de un alcance, el principal objetivo es la determinación de la distancia a la que se encuentra un objeto, pero la visión artificial, aun cuando con frecuencia sigue requiriendo información sobre el alcance, está más orientada a utilizar dicha información para determinar no sólo la distancia a la que se encuentra el objeto, sino además su posición, su orientación, su forma y, en realidad, su identidad. Rosen (1979) ha hecho

una lista de las principales funciones de la visión artificial en los robots como:

- El reconocimiento de piezas de trabajo y ensambles o el reconocimiento del estado estable cuando sea necesario, o ambos.
- La determinación de la posición y la orientación de piezas de trabajo y ensambles relativas a un conjunto preestablecido de ejes de coordenadas.
- La extracción y localización de las características sobresalientes de una pieza de trabajo y ensamble para establecer una referencia espacial para definir un servo visual.
- Inspección en proceso: verificación de que un proceso se ha llevado, o se está llevando a cabo en forma satisfactoria.

### ***Obtención de la imagen***

La primera etapa en cualquier sistema de visión es la obtención de la imagen, que requiere una cámara y un medio de iluminación. Existen dos tipos básicos de iluminación, la reflejada y la de contraste. La iluminación reflejada (PERA, 1982) produce detalles de las características superficiales de cualquier objeto, pero requiere una iluminación cuidadosamente controlada y un poderoso *software* que procese la imagen en múltiples tonos de gris. La iluminación de contraste o iluminación posterior, produce imágenes binarias en blanco y negro y, aun cuando éstas requieren una cantidad mucho menor de procesamiento de datos que las imágenes en tonos grises, la información resultante está restringida al contorno del objeto. La selección de la técnica a utilizar depende de cada aplicación específica.

La cámara es básicamente un transductor que convierte la luminancia de un arreglo de puntos de imagen en un arreglo de señales eléctricas. En las cámaras de tubo termoiónico, tales como las Vidicon, la resistencia eléctrica de puntos individuales en una pantalla fotoconductiva varía con la intensidad de la luz que incide sobre los puntos. La pantalla se barre línea por línea, de izquierda a derecha, de arriba hacia abajo; la salida resultante se conoce como señal de video.

La tecnología de las cámaras Vidicon, aún cuando más barata, está cediendo el terreno gradualmente a la tecnología de estado sólido. La mayoría de las cámaras de estado sólido utilizan dispositivos acoplados con carga (CCD) y, en comparación con sus equivalentes Vidicon, son menos voluminosas y más robustas, tienen una mejor estabilidad geométrica, una menor tendencia al movimiento errático y menos problemas de falta de enfoque. Una cámara CCD de estado sólido común utiliza un arreglo de  $256 \times 256$  fotodiodos, lo que da un total de 65 536 elementos de cuadro o pixel (Boucharlat y colaboradores, 1984). Cada pixel tiene un

área de  $29 \mu\text{m}$  cuadrados y el área total de la zona fotosensible es de sólo 7.4 mm cuadrados. También se cuenta con configuraciones lineales de estado sólido con hasta 2048 pixel, pero para poder completar una imagen es necesario tomar medidas para el movimiento relativo del objeto a lo largo de la línea de visión de la cámara.

### *Procesamiento de la imagen*

La cantidad de datos capturados por una cámara puede ser en realidad impresionante. Antes que nada, la señal de video se somete a una conversión analógica a digital ya sea para producir una imagen simple en blanco y negro o una imagen hasta con 256 niveles de gris (ocho bit). Cuando se procesa una imagen, es necesario almacenar cuando menos un cuadro; en una imagen de  $512 \times 512$  pixel con ocho bit de tonos grises, la información referente a este cuadro podría contener 2 097 152 bit. En las microcomputadoras como Pet y Apple, en las que se utilizan palabras de ocho bit, esto requeriría 262 144 palabras que tales computadoras no pueden manejar. En las minicomputadoras de 32 bit como la VAX 11/750, lo anterior se reduce a 65 536 palabras, pero no deja de ser un requerimiento excesivo. Es obvio que estos requerimientos pueden reducirse ya sea limitando la resolución, los tonos grises o ambos.

En términos generales, el procesamiento e interpretación de estos datos puede clasificarse en dos tareas básicas (PERA, 1982):

- Procesos de rutina relacionados con la preparación de los datos para su análisis posterior. Estos procesos se llevan a cabo en su mayor parte con equipos exclusivos; las tareas más comunes son la eliminación de ruidos y el aumento del contraste.
- Análisis. Este depende por lo general del *software* e incluye actividades como la detección de bordes, la medición de perímetros y áreas, la determinación de la posición y orientación y la identificación.

Considérese una actividad común de análisis, la detección de un borde. Los bordes se detectan buscando cambios bruscos en el gradiente de intensidad. Si no existiera ruido, la anterior sería una tarea sencilla pero, dados el ruido y las imperfecciones de la superficie, es necesario buscar un balance entre la maximización de la detección de los bordes reales y la minimización de la detección de bordes de ruido. Esto se logra utilizando un operador matemático para resaltar los bordes y después aplicar un umbral para distinguir los bordes del resto de la imagen. Muchos operadores usados en forma común aproximan el gradiente de intensidad  $\nabla G$ , en donde

$$\nabla G = \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = G_x + G_y \quad (8.10)$$

$$|\nabla G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (8.11)$$

y  $G$  es la intensidad en el punto  $(x, y)$ . Puede obtenerse una aproximación digital de  $\nabla G$  con la ayuda de la figura 8.11(a) en la que se muestra un pixel  $(i, j)$  y sus ocho vecinos  $a_0$  a  $a_7$ . La derivada parcial en la dirección  $x$  puede aproximarse como

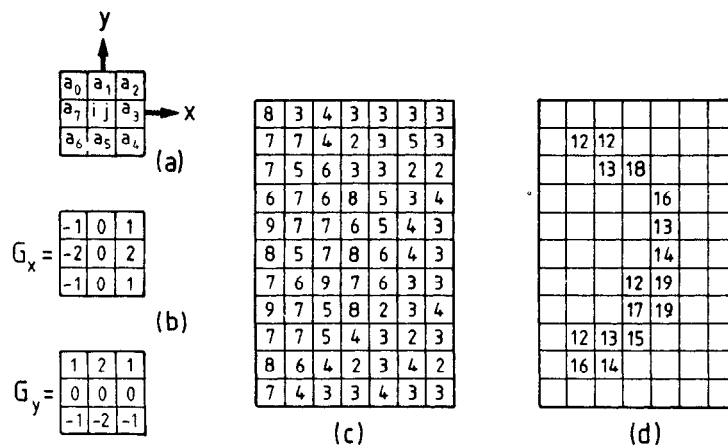
$$G_x = (A_2 + cA_3 + A_4) - (A_0 + cA_7 + A_6) \quad (8.12)$$

y en la dirección  $y$  como

$$G_y = (A_0 + cA_1 + A_2) - (A_6 + cA_5 + A_4) \quad (8.13)$$

en donde  $A_n$  es la intensidad en el pixel  $a_n$  y  $c$  es constante. Cuando  $c = 1$  se tiene el operador Prewitt y cuando  $c = 2$  el operador Sobel (Nevatia, 1982). La dirección del borde se obtiene de  $\theta = \tan^{-1}(G_x/G_y)$ .

Con frecuencia es más fácil manejar estos operadores cuando están escritos en forma cifrada, es decir, como configuraciones de valores que se multiplicarán por las intensidades correspondientes en los pixel y después se sumarán o restarán, según indique el signo del coeficiente en el cifrado. En la figura 8.11(b) se muestran las máscaras para el operador Sobel descrito las ecuaciones (8.12) y (8.13), con  $c = 2$ . Los resultados de



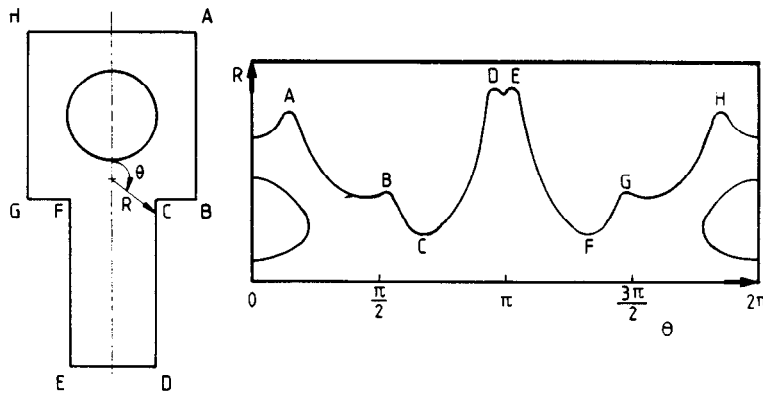
**Figura 8.11** Detección de bordes: (a) un pixel  $(i, j)$  y sus ocho vecinos, (b) máscaras del operador Sobel, (c) una matriz de intensidad, (d) borde detectado utilizando el operador Sobel.

utilizar estas máscaras o filtros para encontrar un borde en la matriz de intensidad de la figura 8.11(c) se muestran en la figura 8.11(d). Se aplicó un umbral de 12 unidades. Este proceso, denominado convolución, es lento cuando las máscaras son de gran tamaño y se ha descubierto que los resultados pueden obtenerse de forma más rápida cuando la convolución se lleva a cabo en el dominio de la frecuencia. Esto requiere la multiplicación de las transformadas rápidas de Fourier discretas tanto de la máscara como de la imagen.

Davies (1984a) explica cómo se usa el operador Sobel en un sistema de visión para examinar productos alimenticios, en particular panecillos. Este autor destaca que la definición de un umbral para la imagen resaltada tiene menor propensión al error que la definición de un umbral para el original. Sin embargo, como se muestra en la figura 8.11(d), los bordes aparecen más gruesos en algunos lugares y pueden adelgazarse en otros. Existen métodos para corregir estas deficiencias, pero el adelgazamiento de los bordes en particular requiere un considerable esfuerzo de cómputo.

### Reconocimiento de objetos

Una vez que se ha encontrado la frontera o límites de un objeto, se podrá emplear un método de seguimiento de los límites para transmitir la información a un algoritmo para análisis de forma. Un método consiste en calcular el centroide de la imagen y después trazar los límites en una gráfica  $(R, \theta)$  como se muestra en la figura 8.12. Esta gráfica tiene un periodo de  $2\pi$ ; en el caso de un objeto conocido, sólo estará desplazada un cierto ángulo fijo  $\alpha$  con respecto a la gráfica  $(R, \theta)$  de una forma ideal del mismo objeto con una orientación estándar (Davies, 1984). Esta forma ideal, o plantilla, se mantendría en la memoria y cambiar los datos de la plantilla con respecto a los datos medidos hasta que ambos coincidan es una tarea



**Figura 8.12** Reconocimiento de objetos: la gráfica  $(R, \theta)$  es exclusiva de un componente en particular.



relativamente fácil. Esto da la orientación  $\alpha$  del componente. Si la concordancia no es satisfactoria, entonces el objeto podrá descartarse dado que no es perfecto o, tal vez, es de una clase distinta.

La concordancia angular es una forma limitada del problema más general de *concordancia con plantilla*. Si un sistema de visión por computadora se ha de usar para determinar la ubicación y orientación de un objeto, así como para reconocerlo, entonces es posible que se requiera una enorme potencia de cómputo. Por ejemplo, si un objeto con un tamaño aproximado de  $30 \times 30$  pixel debe localizarse en una imagen de  $256 \times 256$  pixel, la tarea de buscar la concordancia, moviendo la plantilla sobre la imagen necesitaría tantas como  $256^2 \times 30^2$  ( $\approx 60$  millones) de operaciones básicas (Davies, 1984). Suponiendo, en forma optimista, que el ciclo de cómputo requiere  $1 \mu s$ , entonces el tiempo necesario para lograr la concordancia podría ser hasta de 1 minuto para este caso tan simple. Un tiempo de procesamiento tan prolongado excluiría este tipo de sistema de visión de aplicaciones en línea para el manejo de materiales por medio de robots.

Por fortuna, existen varias formas de acelerar la operación. En una de ellas, el sistema se programa para buscar características sobresalientes como esquinas u orificios; al localizarse alguna de estas características sobresalientes, buscar y localizar una característica secundaria que se encuentra a una distancia conocida es una tarea relativamente pequeña. La identificación de estas dos características confirma la identidad del objeto y provee información sobre su posición y orientación.

Otro método para reducir la carga de cómputo consiste en llevar a cabo cálculos sólo en áreas locales, las relaciones globales se obtienen de combinaciones de estos cálculos individuales, en una supuesta analogía con el sistema visual humano (Nevatia, 1982). Los métodos  $n$ -tuples lógicos (Aleksander, 1983) caen dentro de esta categoría; un  $n$ -tuple es un grupo de pixel que se procesa como una sola entidad. Para una tarea sencilla se ha demostrado que este método requiere  $1/25$  de la capacidad de almacenamiento requerida por el método de concordancia con plantilla (Aleksander, 1983).

El método anterior trata de aprender del procesamiento en paralelo que utiliza el sistema visual humano. Las ventajas del procesamiento en paralelo son reconocidas y en la actualidad se aplican a los sistemas de visión. En el procesamiento en serie el procesador barre la imagen en forma secuencial, mientras que en el procesamiento en paralelo se asigna un procesador individual a cada pixel y todos los procesos se operan en paralelo. Esto conduce a mejoras substanciales en la rapidez de cómputo (Fountain, 1983).

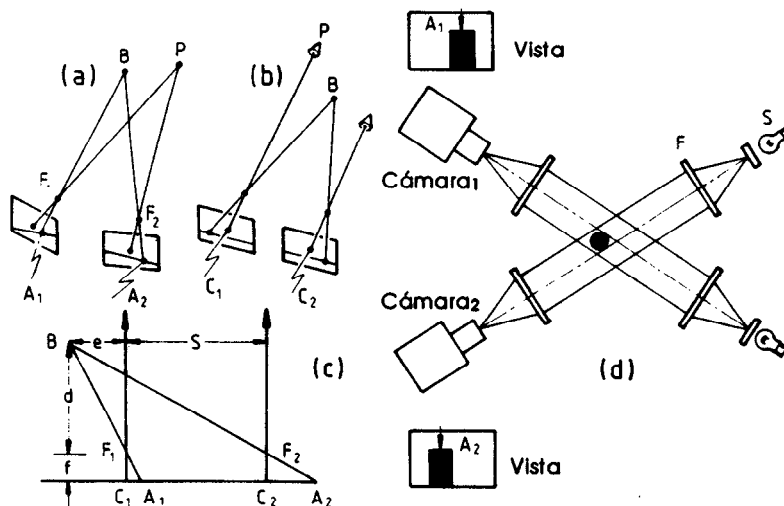
Una opción aparte de la concordancia con plantilla es la obtención de medidas o características de la imagen para utilizarlas en su clasificación. Este método se conoce como *clasificación de patrones* en el espacio de características; es una técnica particularmente útil cuando existen varios

objetos colocados al azar dentro del campo visual. Muchas de las características de la imagen pueden usarse para este fin: área, perímetro, rectángulo mínimo de contención, centroide, vector de radio mínimo, vector de radio máximo, orificios, etc. Puede generarse un vector de características para cada objeto, que se puede comparar con vectores de características almacenados en la memoria con fines de identificación.

El problema de "selección de charolas" es uno de problemas más importantes enfrentados por los sistemas para reconocimiento de objetos. Para que un robot pueda ser capaz de sacar un componente en particular de una charola que contiene varios componentes distintos, deberá tener la capacidad para identificar las distintas piezas y determinar su relación con cada una de las otras piezas y sus posiciones en un espacio tridimensional. Un sistema comercial descompone la imagen en burbujas de luz y se fija en la burbuja de mayor tamaño, suponiendo que será la más fácil de sujetar. Posteriormente viene la identificación (Edson, 1984). En otro sistema se trata de identificar las partes antes de sujetarlas comparando los vectores de características de las burbujas de luz con plantillas almacenadas en la memoria.

### Medición y análisis de la profundidad

Las técnicas anteriores se preocupan fundamentalmente del reconocimiento de un objeto a partir de una imagen o silueta bidimensional. No se ha



**Figura 8.13** Estereoscopia para determinación de rangos: (a) el punto  $B$  a partir de las imágenes  $A_1$  y  $A_2$ , (b) si los ejes ópticos son paralelos las líneas epipolares son paralelas a  $F_1F_2$ , (c) geometría para determinar el rango, (d) uso de óptica de proyección en paralelo.

considerado la tercera dimensión, la de la profundidad. Se demostró antes cómo se puede obtener información sobre el rango a partir de medios ópticos que utilizan los métodos de tiempo de vuelo y triangulación óptica. En esta sección se ilustrará cómo los sistemas de visión para robots pueden determinar una profundidad y cómo dicha información se usa para la identificación de objetos.

Primero se considerará la estereoscopia, o triangulación pasiva, es decir, la triangulación que se lleva a cabo con luz ambiental. Esta técnica requiere dos cámaras cuyos ejes ópticos convergen en un punto  $P$  que forma imágenes en los puntos principales  $C_1$  y  $C_2$  (figura 8.13(a)). Un punto objetivo  $B$ , que no se encuentra en el plano  $PC_1C_2$  forma imágenes en  $A_1$  y  $A_2$ . Los lentes de la cámara se encuentran en  $F_1$  y  $F_2$ . El plano  $BF_1F_2$ , interseca las imágenes a lo largo de ejes epipolares y como el punto  $B$  se mueve sobre este plano, sus proyecciones  $A_1$  y  $A_2$  se mueven sobre estas líneas epipolares (Fryer 1984). De la figura 8.13(a) puede apreciarse que las líneas epipolares no son paralelas, de manera que la disparidad estereoscópica de las dos imágenes de  $B$  tiene componentes verticales y horizontales. Lo anterior complica la determinación de la posición absoluta de  $B$ . Los cálculos pueden simplificarse en forma considerable si los ejes ópticos son paralelos como en la figura 8.13(b). En este caso las líneas epipolares son paralelas a  $F_1F_2$  y esto puede ser particularmente ventajoso en el caso de imágenes con formas rectangulares.

En la figura 8.13(c) se muestra una proyección en el plano de los ejes ópticos. Por medio de triángulos similares

$$\frac{d}{f} = \frac{e}{C_1A_1} = \frac{e+s}{C_2A_2} \quad (8.14)$$

o bien

$$d = \frac{sf}{C_2A_2 - C_1A_1} = \frac{sf}{\beta} \quad (8.15)$$

en donde  $\beta$  es la disparidad estereoscópica. Es fácil demostrar que la altura  $H$  del punto  $B$  sobre el plano  $PC_1C_2$  se puede obtener de

$$H = dh/f$$

en donde  $h$  es la distancia de los puntos de imagen  $A_1$  y  $A_2$  por debajo de la línea  $C_1C_2$ .

Una dificultad importante, conocida como el *problema de correspondencia*, radica en la identificación de los puntos  $A_1$  y  $A_2$  que corresponden a imágenes del mismo punto objetivo  $B$ . Este es un problema dado que ciertas superficies, visibles desde una cámara, pueden quedar ocultas para la otra cámara. Además, los efectos de la iluminación particular pueden

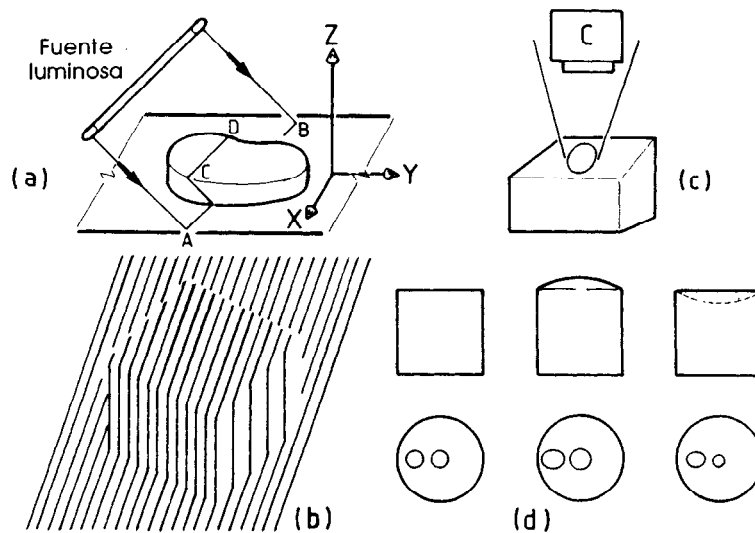
mostrar distintas características de la imagen en las dos vistas; una sombra presente en una vista puede no existir en la otra. La correspondencia se establece haciendo coincidir características específicas, como esquinas u otras regiones claramente definidas. Se ha informado sobre una resolución de profundidad de 5 mm en 2 metros (Yakimovsky y Cunningham, 1978).

Se ha utilizado una iluminación posterior en paralelo para evitar algunos de estos problemas (Jones y Saraga, 1981). La tarea consistente en colocar tres anillos de distintos tamaños en un torre formada por tres discos excéntricos, se había planeado para incluir los elementos clave de varios problemas industriales. Se utilizaron proyecciones ópticas en paralelo figura (8.13(d)). El objeto se iluminaba por la parte posterior por medio de rayos paralelos generados por pequeñas fuentes luminosas *S* en los focos de los lentes Fresnel *F*. Las combinaciones de lentes Fresnel y lentes de cámara adicionales producía imágenes reales de las proyecciones paralelas del objeto en dos cámaras de televisión. El tamaño de la imagen es independiente de la posición del objeto y esto simplifica el análisis de la figura. Además, la posición del objeto en forma perpendicular al eje se da en forma directa a partir de la posición de su imagen en la cámara de televisión. Una ventaja adicional es la inmunidad a cambios en la iluminación ambiente, dado que sólo la luz que es claramente paralela al eje óptico pasa a través de los lentes de la cámara.

La triangulación activa, en contraposición a la pasiva, utiliza una fuente luminosa activa controlada para iluminar puntos selectos en la escena y un sensor direccional que puede detectar la reflexión de la fuente luminosa controlada. En general, no se requieren condiciones especiales de iluminación ambiente. Se hizo referencia previa a dos detectores ópticos de rango de este tipo (figura 8.10). El principio es en esencia el mismo que el de la estereoscopia (figura 8.13(a)), pero se reemplaza una de las cámaras por una fuente de luz colimada. Una de las ventajas de esta configuración es la eliminación del problema de correspondencia.

El barrido de un objeto puede acelerarse si se utiliza un plano de luz en lugar de un solo haz luminoso. Esta forma de iluminación se conoce como luz estructurada; la información contenida en la estructura de la luz se combina con la de la imagen para determinar el rango. El principio de operación se ilustra en la figura 8.14(a). El objeto se ilumina sobre un plano en tres dimensiones y forma una imagen lineal sobre el plano de formación de imágenes. Cada punto sobre la línea de imagen se asocia a un punto correspondiente en el objeto por medio de una línea recta. El punto del objeto se sitúa en la intersección de esta línea recta y el plano de iluminación conocido.

Esta forma de luz estructurada se ha usado en un sistema robot basado en la visión diseñado para seleccionar partes colocadas al azar en una banda transportadora móvil (Holland y colaboradores, 1979). Esta aplicación, sin embargo, no contemplaba información sobre profundi-



**Figura 8.14** Luz estructurada para determinación de profundidad: (a) la deflexión de la línea  $CD$  por el objeto se usa para determinar su forma, (b) uso de planos paralelos de luz, (c) uso de un cono de luz, (d) vista en la cámara de objetos con una vista similar en un plano.

des, es decir, la dimensión  $z$  en la figura 8.14(a). Utilizaba la deflexión de la línea  $CD$  para determinar la forma geométrica del componente en las coordenadas  $XY$ . Un arreglo lineal de cámaras se colocaba en forma vertical sobre la línea  $AB$ , la proyección del plano luminoso sobre una banda móvil horizontal. Cuando un objeto intersectaba el haz luminoso, la proyección se desplazaba a  $CD$ , fuera del campo visual de la cámara. De esta forma, la cámara percibía una línea brillante con un espacio libre en el centro igual al ancho del componente. La cámara barría la banda transportadora a una velocidad constante y para cada incremento igual en el desplazamiento de la banda el sistema de visión registraba uno de estos barridos. Esto suministraba suficiente información para determinar la forma geométrica del objeto en las coordenadas  $XY$ . La luz estructurada planar también se utiliza para guiar a robots soldadores. La intersección de la placa luminosa con la superficie de la pieza de trabajo forma una banda curveada o recta que describe la configuración de una sección cruzada particular de la pieza de trabajo. Esta información puede usarse para guiar el portaelectrodos de soldadura (Morgan y colaboradores, 1983).

Un plano de luz puede obtenerse al iluminar una ranura lineal o al hacer pasar un rayo colimado a través de lentes cilíndricos (Nevatia, 1982). En la figura 8.14(b) se muestra la imagen formada mediante el barrido de un cubo con una serie de planos paralelos. Como puede verse, este procedimiento tiene una resolución muy pobre para superficies casi paralelas al

plano de iluminación, pero esto puede compensarse utilizando dos series ortogonales de barredores (Shirai, 1972); ésta técnica puede instrumentarse fácilmente mediante el uso de un espejo de barrido y lentes cilíndricos giratorios. Además se puede utilizar luz estructurada codificada por medio de una rejilla, en la cual una rejilla cuadrada se proyecta sobre la superficie del objeto (Nevatia, 1982).

Un ejemplo final de luz estructurada se ilustra en la figura 8.14(c). En este caso la luz se estructura en la forma de un cono; cuando se proyecta hacia abajo sobre la superficie del objeto, forma una línea brillante que encierra un área cuya forma determina la naturaleza de la superficie reflejante. Por ejemplo, si la superficie es plana y forma ángulos rectos con respecto al eje del cono, se produce un círculo; si es plana y angulada, el resultado es una elipse. Estas imágenes se reciben con una cámara, colinear con respecto al eje del cono, y esta distribución elimina los efectos de las sombras. En la figura 8.14(d) se muestran las imágenes recibidas de tres objetos que difieren sólo en sus superficies superiores y que resultaría difícil separar si se vieran desde la parte superior bajo una luz no estructurada.

Las variaciones en la reflectividad producidas por la distancia también se han usado para la detección de rangos (Nevatia, 1982), pero el espacio no nos permite analizar en detalle esta característica. Ahora es el momento adecuado para examinar cómo el robot puede utilizar esta información sensorial en forma "inteligente".

### **8.7 Inteligencia artificial**

Alan Turing, uno de los pioneros de la computación, propuso lo que ha llegado a conocerse como juego de preguntas y respuestas de Turing para la definición de la inteligencia artificial. La idea en la que se sustenta esta definición es la del juego en el que un jugador, que sostiene una conversación con otra persona, debe determinar si ésta se trata de un hombre o una mujer. Una tercera persona actúa como intermediario de manera que el jugador no pueda ver o escuchar, sino que obtiene toda su información haciendo preguntas. Turing sugirió que si se estableciera un juego similar con una máquina, y el jugador no pudiera determinar si su "oponente" oculto es un ser humano o una máquina, entonces podría asegurarse que la máquina ha alcanzado el nivel de inteligencia del ser humano.

La inteligencia artificial se desenvuelve en dos planos principales; uno es entender los principios de un comportamiento o conducta inteligentes y el otro es construir modelos funcionales de comportamiento inteligente (Winston, 1977). Este libro se concentra en este último, en particular en relación con los robots inteligentes. El campo de la inteligencia artificial abarca una amplia gama de actividades de investigación que se traslapan

en mayor o menor grado (Barrar, 1980), incluyendo la percepción visual, comprensión del lenguaje, sistemas expertos, manejo de datos, programación automática y juegos. De éstas, es posible que las dos primeras sean las que mayor importancia tienen para la robótica. En este libro se ha de analizar en mayor detalle la percepción visual. Los sistemas para procesamiento de voz, un subconjunto de la comprensión del lenguaje, se han de cubrir en la sección 10.5. (Véanse Winston (1977), Barrar (1980), Wino-gard (1972) y Baker (1981)).

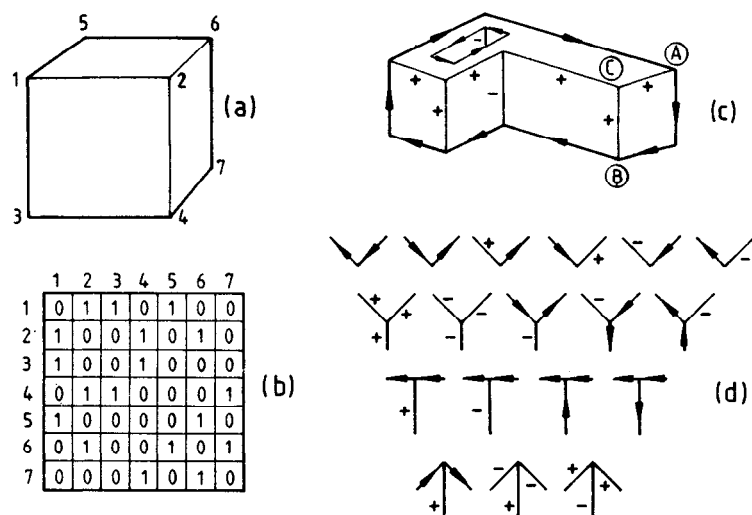
### **Percepción visual**

El objetivo de suministrar a un robot un medio propio para percibir el mundo que lo rodea es importante y alcanzarlo permitiría a los robots actuar como inspectores, ensambladores o exploradores. En realidad es un paso necesario en el camino hacia el robot autónomo.

Como ya se ha visto, la visión por computadora puede usarse para la identificación de componentes; esta actividad por sí misma podría considerarse como una demostración elemental de inteligencia de la máquina. La tarea de identificación es en esencia una actividad de reconocimiento de patrones matemáticos que utiliza distintos componentes calculados a partir del patrón. El *análisis de escenas*, la siguiente etapa en cuanto a complejidad, consiste en descomponer una escena en los componentes que la integran y determinar la relación espacial de dichos componentes.

Debido a la complejidad de esta tarea, muchas de las investigaciones relevantes a la fecha se han concentrado en un “mundo de bloques” que consiste en objetos poliédricos colocados sobre una mesa. El análisis de escenas tridimensionales se originó a principios de los años sesenta y se utilizó por primera vez en los trabajos de Roberts (1963) relacionados con el reconocimiento de poliedros tridimensionales desde una sola de sus vistas. Su programa permitía determinar las dimensiones, la ubicación y la orientación de objetos y, armado con esta información, podía construir una imagen de la escena observada desde otro punto de vista. Primero se detectaban los bordes y las esquinas y se utilizaban para construir un dibujo lineal o imagen prima. Esta imagen se interpretaba entonces identificando los triángulos, cuadriláteros y hexágonos que sugerían posibles salidas y que, finalmente, permitía incorporar todas las líneas y uniones como bordes y esquinas de cada objeto en particular.

Aleksander y Burnett (1983) describieron un ejemplo simplificado de concordancia topológica basado en el método Roberts. En la figura 8.15(a) se muestra la imagen prima de un cubo. Al numerar los vértices del 1 al 7 (el 8 está oculto) es posible representar la forma topológica (o estructura) en forma matricial, como en la figura 8.15(b). En esta figura aparece un 1 siempre que dos vértices están unidos por un borde y un 0 cuando no. Pueden construirse matrices similares para otros poliedros,



**Figura 8.15** Percepción visual: (a) imagen de un cubo y (b) su representación matricial, (c) bordes y líneas, (d) los 18 vértices físicamente posibles para objetos triédricos.

vistos desde distintos ángulos y su uso permite la comparación con una serie de matrices almacenadas, cada una de las cuales representa un poliedro en particular. Por lo tanto, es posible reconocer un bloque en particular basándonos sólo en su estructura topológica.

Conforme aumenta el número de objetos en una escena, el ocultamiento de unos por otros se convierte en un problema importante en términos de su reconocimiento. Sin embargo, esto puede ser solucionado si las líneas, vértices y caras pertenecientes a los distintos objetos pueden separarse (Nevatia, 1982). Esta operación, conocida como problema de segmentación, ha sido tema de múltiples investigaciones. (Véanse Winston (1977), Guzman (1968), Huffman (1971) y Clowes (1971)).

La interpretación de un dibujo lineal de un objeto tridimensional requiere un estudio de las líneas y de la forma en que se combinan en los vértices. Las líneas se clasifican en dos categorías principales, líneas exteriores y líneas interiores; las líneas exteriores separan regiones que pertenecen a objetos diferentes y las líneas interiores separan las regiones que pertenecen a un mismo objeto (Winston, 1977). Las líneas interiores pueden subdividirse, además, en bordes convexos y bordes cóncavos. En los bordes convexos las dos caras se alejan del borde desde el punto de vista del observador; en los bordes cóncavos las caras están hacia el observador. Esto se ilustra en la figura 8.15(c) en la cual un + indica un borde convexo, un - un borde cóncavo y una flecha de límite se dirige de manera que la cara visible quede siempre hacia la derecha.



Sólo se han de considerar objetos triédricos, es decir, aquéllos en los que cada vértice está formado por la intersección de tres caras (como en la figura 8.15(c)). En el caso de este tipo de objetos es fácil percibir que solamente son posibles cuatro tipos de vértices, en L, en horquilla, en T y en flecha (mostrados en orden descendente en la figura 8.15(d)). Dado que existen cuatro maneras de clasificar o marcar cualquier línea dada, existen por lo tanto 16 formas de marcar una L, y 64 formas para las horquillas, las flechas y las Tes, lo que da un gran total de 208 vértices teóricamente posibles. Por fortuna, se ha mostrado (Winston, 1977; Guzman, 1968; Huffman, 1971) que sólo 18 de estos vértices son posibles en forma física y se muestran en la figura 8.15(d).

¿Cómo se utiliza esta información en el análisis de escenas? Si se regresa a la figura 8.15(c), en la que se muestra un objeto en forma de L con un orificio, se observa que fue fácil clasificar o marcar los bordes al conocer la naturaleza física del objeto. El truco consiste en invertir este proceso de manera que la realidad física pueda inferirse a partir de un conocimiento de los bordes. Hágase el intento de hacer esto suponiendo que la figura 8.15(c) es una imagen prima. Primero, el borde que separa un objeto o una colección de objetos de un fondo es un círculo cerrado con flechas que lo rodean siguiendo la dirección del movimiento de las manecillas del reloj; de esta forma se identifican ocho líneas. Los bordes del orificio interior deben formar un ciclo cerrado con las flechas de marca siguiendo una ruta en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj, lo que permite la identificación de cuatro líneas adicionales. Ahora será necesario examinar ocho vértices. Existen tres horquillas y cinco flechas. Si se considera una flecha en el vértice *A* puede apreciarse que en el último renglón de la figura 8.15(d) se indica que el borde interno de *A* debe ser convexo. Un argumento similar muestra que el borde interno en *B* también es convexo. Al pasar ahora a la horquilla en *C* se nota que los bordes de *A* y *B* son ambos convexos y la figura 8.15(d) muestra que el tercer borde está restringido, por lo tanto, a ser también convexo. Si se procede de esta manera es posible identificar todos los bordes. Por lo tanto, al comenzar a partir de un dibujo lineal bidimensional es posible determinar la configuración topológica del objeto real.

Esta técnica se ha creado para identificar hendiduras (es decir, lugares donde un cuerpo se asienta sobre otro) y sombras (Waltz, 1975), pero el avance más importante lo logró Winston (1975) quien mostró cómo algunos objetos simples, una vez identificados, pueden acomodarse en las llamadas *redes semánticas* para representar objetos más complicados. Por ejemplo, su programa podría examinar un mundo de bloques e identificar configuraciones particulares como mesas o arcos. Este fue un paso importante en el camino que va de la visión a la percepción.

### **8.8 Resumen**

Es necesaria una segunda generación de robots que cuenten con la habilidad para interactuar y relacionarse con el mundo externo que los rodea. Estas máquinas requieren capacidades sensoriales no muy distintas a las de los seres humanos y, en muchos casos, muy superiores a ellas. Dos de estos sentidos, el tacto y la vista, se han examinado en detalle.

Los sensores de tacto pueden ser pulsadores mecánicos o microinterruptores bastante simples, pero los sensores táctiles son mucho más complicados: pueden proporcionar información sobre la fuerza, la posición, el deslizamiento y la forma. Tanto los sensores de tacto como los táctiles responden a las fuerzas de reacción entre unas tenazas y un objeto, pero los sensores de fuerzas y pares totales, proveen información sobre las fuerzas y pares de reacción entre un objeto y el ambiente externo. Son importantes para cualquier actividad de ensamblaje.

La detección sin contacto presenta varias ventajas. Se ha discutido el uso de detectores de proximidad y determinadores de alcances para distancias más grandes.

Se han descrito diversos aspectos de la visión artificial, incluyendo la percepción y el procesamiento de imágenes. Estos aspectos, junto con el reconocimiento de objetos, requieren el procesamiento de vastas cantidades de información. La medición de una profundidad es un problema particularmente importante; esta medición puede llevarse a cabo a través de una triangulación pasiva, como en la estereoscopia o de una triangulación activa, como es el caso de la luz estructurada.

La incorporación de sentidos en una máquina es el primer paso hacia el logro de la inteligencia artificial; este hecho se ha ilustrado en relación con la percepción visual.

# Capítulo 9

## *Aplicaciones de los robots*

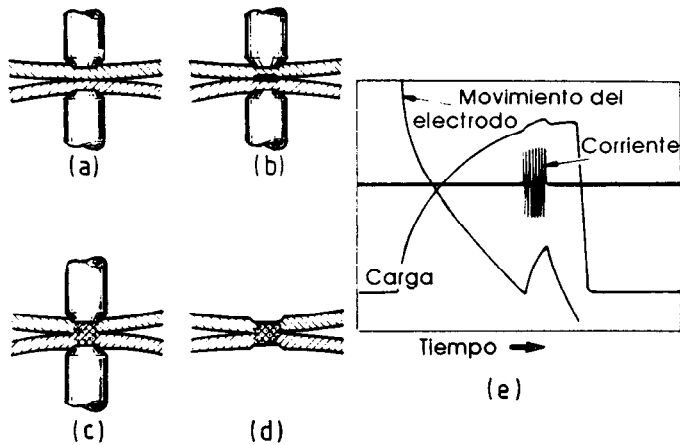
---

### **9.1 Introducción**

Muchos textos sobre robots industriales han tratado de predecir las capacidades futuras de estas máquinas. Las predicciones son de dos tipos principales que contrastan por completo: en un extremo, aquéllas que pretenden mitigar el miedo a que los robots desplacen a los humanos de sus trabajos enfatizando que las habilidades de las máquinas son, y siempre serán, limitadas; en el otro extremo, se encuentra la vertiente que asegura que, con los avances en la tecnología de control y en la inteligencia artificial, no existen límites a las tareas que los robots puedan realizar. Estas predicciones con frecuencia han resultado equivocadas y no se han de tener en cuenta, excepto para establecer que tal vez lo menos adecuado sea limitar la visión sólo a la industria manufacturera. Las tecnologías que contribuyeron a la construcción de los robots industriales o que emergieron como consecuencia de él, están encontrando aplicaciones en áreas distintas a las plantas industriales; este libro intenta reflejar esta diversidad. Sin embargo, una vez que se ha aclarado lo anterior, el presente capítulo se limita a estudiar los robots industriales dentro de los procesos de manufactura. Las aplicaciones son muchas y variadas, por lo que en razón del espacio disponible, será necesario concentrar la atención en algunas de las áreas más comunes.

### **9.2 Soldadura por puntos**

La mayoría de los procesos de soldadura emplean una corriente eléctrica para calentar y fundir las piezas de trabajo que se han de unir. La soldadura por puntos de resistencia, llamada generalmente soldadura por puntos, suelda el material al hacer pasar una corriente a través de la unión. También



**Figura 9.1** Soldadura por puntos: (a) aplicación de presión, (b) flujo de corriente, (c) se mantiene la presión después de interrumpir el flujo de corriente, (d) soldadura terminada, (e) curvas de la corriente, la carga y del movimiento del electrodo.

se requiere una presión mecánica para consolidar la unión. La corriente se obtiene de un transformador de reducción y los brazos, electrodos y pieza de trabajo completan el circuito secundario.

La formación de un punto de soldadura depende de un ciclo de eventos:

- 1) se aplica una presión
- 2) el paso de la corriente funde el metal
- 3) la presión se mantiene mientras la soldadura se solidifica
- 4) se libera la presión

En las figuras 9.1(a) a (d) se ilustra un corte longitudinal de la soldadura por puntos durante estas etapas y en la figura 9.1(e) (Houldcroft, 1979) se muestra cómo la carga, el movimiento del electrodo y la corriente cambian con el tiempo. Inicialmente se aplica una presión para poner las piezas en contacto. La selección correcta del material y de la forma para el electrodo implica que la resistencia de la unión seca es mayor que las otras resistencias en el circuito, como son las de los electrodos, las de los contactos entre electrodo y la pieza de trabajo, y la del material de la pieza de trabajo. El paso de la corriente origina un calentamiento en la unión y la formación de un "punto" de material fundido. El punto sella en forma efectiva y su expansión con la temperatura provoca una ligera apertura de los electrodos. Después de suspenderse el paso de la corriente el punto se enfría por conducción al material que lo rodea, se solidifica y se contrae; en este momento se libera la presión y la soldadura queda terminada.

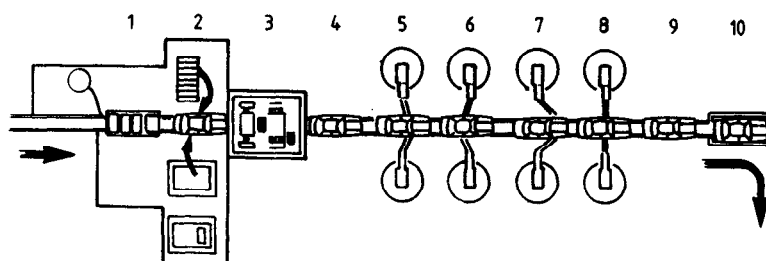
Diversos parámetros afectan el tamaño, la forma y la calidad de una soldadura por puntos, como son el diámetro y la forma del electrodo, la

fuerza aplicada, la corriente y la duración de los eventos. No resulta práctico controlar el tamaño o la temperatura del punto durante la soldadura o probar la soldadura posteriormente. Por lo general los parámetros para una soldadura óptima se establecen anticipadamente para un trabajo en particular y el único control directo necesario para la soldadura, en sistemas manuales o automáticos, es la colocación de los electrodos y la iniciación del ciclo de soldadura. El ciclo en la figura 9.1(e), por ejemplo suelda dos placas de acero suave de 1.6 mm elevando la fuerza del electrodo a 4400 N, haciendo pasar una corriente de 5.8 kA durante 15 ciclos (suministro de 50 Hz) y manteniendo la fuerza en el electrodo durante 0.45 s adicionales. Los electrodos son de sección circular con extremos cónicos o en forma de domo para asegurar un contacto adecuado y por lo general se enfrían con agua. La fuerza de contacto se suministra por lo regular con un cilindro neumático. Los robots industriales se usan en la soldadura por puntos más que en cualquier otra aplicación. La industria automotriz, siempre a la cabeza en la automatización de los procesos de manufactura, reconoció rápidamente la soldadura por puntos como un área que ofrecía grandes oportunidades de aplicación para los robots. La soldadura por puntos puede automatizarse con equipo específico y los robots comparten con estos sistemas las ventajas de una calidad de soldadura consistente, pero la flexibilidad inherente de los sistemas robot es en particular valiosa en la fabricación de automóviles, en la cual es común que sea necesario acomodar frecuentes cambios en el diseño con un mínimo de reajustes o reprogramación.

Existen cuatro factores que contribuyen al tiempo requerido para soldar por puntos una carrocería automotriz:

- El tiempo para cada soldadura, el cual es fijo y no está bajo el control del robot.
- El tiempo que se necesita para mover los electrodos de un punto al siguiente. Este tiempo es significativo debido a que la reducida distancia entre los puntos no permite que el robot desarrolle su máxima velocidad. Por lo tanto, el tiempo requerido para el desplazamiento entre dos puntos depende en gran medida de la capacidad de aceleración y desaceleración del robot.
- El movimiento de los electrodos entre las áreas de soldadura, el cual puede requerir cambios importantes en la orientación.
- El tiempo que el robot permanece inactivo mientras que las piezas de trabajo se cargan o descargan.

Las velocidades de producción que se encuentran en la fabricación de automóviles permiten realizar grandes instalaciones con múltiples robots, de manera que el movimiento entre las áreas de soldadura pueda reducirse al asignar un robot a cada una de las áreas de la carrocería. Existe un límite práctico, sin embargo, para el número de robots que pueden



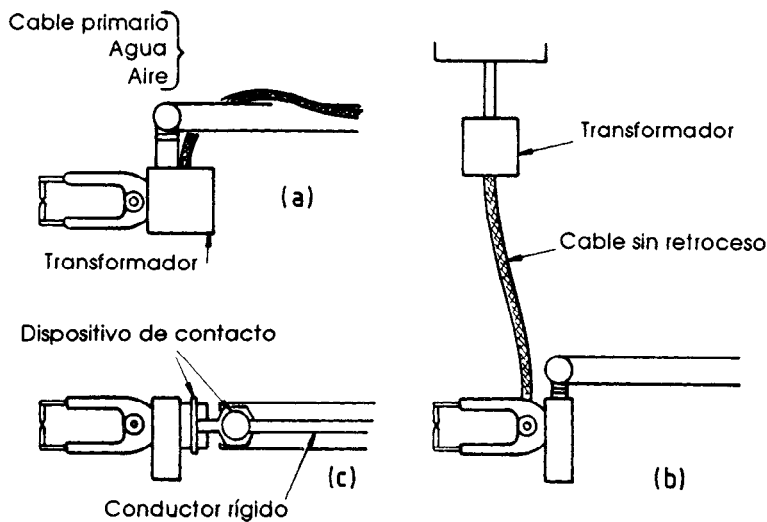
**Figura 9.2** Línea de soldadura por puntos en una planta automotriz.

operar en forma simultánea en una carrocería; de aquí la familiar línea de soldadura por puntos, de la cual se muestra un ejemplo en la figura 9.2 (Stauffer, 1983). La línea comprende varias estaciones y todos los robots sueldan en forma simultánea. Cuando todos los robots han completado sus tareas de soldadura, la carrocería se desplaza a la siguiente estación; se indica el fin de ciclo a la línea, la carrocería completa sale de la línea y se carga una nueva parte en ella.

La línea que se muestra en la figura 9.2 es la mitad de la línea de formación de carrocerías del *Jeep Sportwagon* fabricado en Toledo, Ohio. Este segmento de la línea aplica más de 300 soldaduras sobre el techo y la parte superior de la carrocería (existen cerca de 3200 puntos de soldadura en una carrocería completa) y existen diez estaciones en la línea.

La carrocería parcialmente terminada llega a la estación 1 en donde se aplica un sellador en forma manual. Después de indicar el fin de ciclo, la carrocería se encuentra en la estación 2 en donde el panel del techo y la capota adecuados se colocan en forma manual y se aseguran por medio de pasadores removibles. En la estación 3 un robot de doble estructura y soldadoras fijas aplican las soldaduras iniciales, con lo que se define la forma geométrica de la parte. A la estación inactiva (4) la siguen cuatro estaciones de soldadura con dos robots cada una, en las cuales se completa la soldadura del techo y la parte superior de la carrocería. Después de otra estación inactiva el ensamble se descarga en forma automática en la estación 10. Para esta secuencia se emplean robots Cybotech modelo H80; estas son máquinas impulsadas por medios hidráulicos con seis grados de libertad. Dado que los electrodos son circulares, pueden girar sobre su eje sin afectar la soldadura, por lo que en algunas circunstancias es posible realizar una soldadura por puntos con un manipulador que tiene cinco grados de libertad. Sin embargo, seis grados de libertad son más prácticos en el ensamble de automóviles ya que el ángulo de acercamiento de algunas soldaduras con frecuencia está restringido por la necesidad de evitar puntos de colisión entre el ensamble y el brazo del robot.

La habilidad de un robot para generar señales de salida y para operar en forma condicional de acuerdo con el estado de las señales de entrada es esencial para la operación de una línea como la descrita. Las últimas etapas



**Figura 9.3** Soldadura por puntos utilizando un robot: (a) transformador montado en la muñeca, (b) transformador remoto, (c) corriente secundaria a través de conductores rígidos y dispositivos de contacto.

en la secuencia de cada robot consisten en retirarse alejándose de la pieza de trabajo y generar una señal de salida para indicar que se ha concluido la tarea. Estas señales llegan a un generador de secuencias, que indicará el fin de ciclo a la línea sólo cuando todos los robots hayan indicado la terminación de su tarea. Cada robot estará entonces esperando una señal del generador de secuencias que indique que la línea ha sido indexada y puede comenzar nuevamente la operación de soldadura. El generador de secuencias puede ser un procesador lógico programable o una computadora; en el ejemplo antes citado el generador de secuencias es un controlador lógico programable y se comunica con los robots a través de un controlador lógico programable instalado en cada estación.

El tiempo de ciclo de una línea consiste en el tiempo de ciclo de la estación más lenta más el tiempo requerido para indicar a la línea que el ciclo ha terminado. Un buen balanceo de la línea asegura un mínimo de tiempo muerto para los robots.

Como el circuito secundario del transformador de soldadura transporta una corriente muy alta a bajos potenciales, las pérdidas pueden ser elevadas en el cable que va del transformador a los electrodos de soldadura si el transformador está montado al lado del manipulador y los cables se desplazan a lo largo de los brazos. Esto puede solucionarse al montar el transformador con los electrodos de soldadura (figura 9.3(a)); la conexión eléctrica flexible es más ligera y no sufre estas pérdidas ya que transporta una corriente relativamente baja a un potencial elevado. Es necesario un

suministro de agua para enfriar los electrodos y se requieren conexiones de aire para el accionar mecánico. Si el peso impide esta configuración (la masa de los electrodos de soldadura puede ser tan grande como 60 kg) el transformador puede montarse en forma transversal en la parte superior y la corriente secundaria puede alimentarse a través de una conexión flexible montada en la parte superior, un “cable sin retroceso”, de los electrodos figura 9.3(b)).

Al tener en mente las pérdidas mecánicas y eléctricas en los sistemas anteriores, y que los cables flexibles, que restringen el movimiento del robot, tienen una vida limitada, se ha diseñado un sistema de conductores secundarios rígidos montados en los brazos del robot (figura 9.3(c)) (Kaufmann, 1983). Se utilizan conductores rígidos eficientes y las uniones se acomodan en un dispositivo de contacto que consiste en dos placas en contacto deslizante. El dispositivo requiere una presión para empujar las placas y lograr una conexión eléctrica adecuada; esto es posible gracias a un cilindro neumático. El que el dispositivo de contacto quede asegurado por medios mecánicos cuando se establece el contacto no tiene ninguna consecuencia, dado que el robot está siempre inmóvil cuando se requiere una aplicación de corriente.

### 9.3 Moldeo por inyección

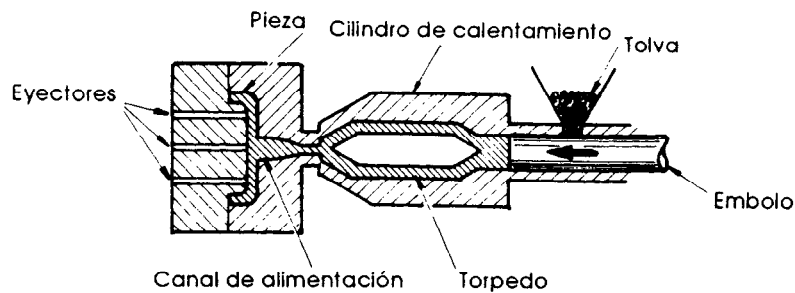
El moldeo por inyección es el proceso de calentar gránulos de un polímero hasta alcanzar la viscosidad correcta y medir una inyección (es decir, la cantidad adecuada para llenar la cavidad del molde) a un molde. El proceso de moldeo en sí mismo requiere sólo una mención muy breve ya que el papel del robot en el moldeo por inyección consiste en descargar la máquina; su presencia no afecta el proceso en forma directa.

El ciclo de moldeo tiene seis etapas:

- 1) cierre del molde
- 2) inyección del polímero
- 3) tiempo de residencia
- 4) asentamiento (un molde caliente ayuda al curado de un polímero termoestable; un molde frío endurece un material termoplástico)
- 5) apertura del molde
- 6) remoción de la parte

Se requieren fuerzas muy grandes para sujetar el molde, durante la inyección, dado que la elevada presión de inyección (hasta  $120 \text{ MN/m}^2$ ) puede actuar sobre una gran área proyectada de la parte. Las máquinas, por lo tanto, tienden a ser grandes y costosas, por lo que es muy conveniente reducir al mínimo el tiempo muerto de la máquina, es decir, acelerar la descarga. Cuando el molde se abre, el orificio a través del cual el polímero ingresó al molde presenta una barra acanalada horizontal, que es conve-





**Figura 9.4** Sistema de moldeo por inyección.

niente para sujetar la parte a lo largo del eje de la máquina para retirarla (figura 9.4). Tres grados de libertad son suficientes para una descarga automática y las máquinas de moldeo por inyección con frecuencia están acopladas en forma directa a descargadores que en realidad son dispositivos de selección y colocación con tres grados de libertad.

Resultaría costoso utilizar un sistema robot flexible para el papel inflexible de descargador de una sola máquina. Se ha encontrado que es posible descargar hasta cuatro máquinas con un mismo robot y las partes pueden tomarse en forma directa de la máquina para otras operaciones, por ejemplo, recorte, perforación, aglomerado o ensamble. Un ejemplo característico se da en la manufactura de la cubierta externa de plástico de una aspiradora (Warnecke y Schraft, 1982), en donde el robot descarga la cubierta exterior de una máquina de moldeo por inyección y la coloca en una prensa de recorte; en ésta se eliminan todos los bordes sobrantes. La parte se lleva después a una máquina perforadora y, por último, el robot la coloca sobre una banda transportadora.

La interrelación entre el robot y la demás maquinaria es una parte importante de una operación como la descrita. Considérese el ciclo en más detalle. La puerta de seguridad de la máquina de moldeo por inyección se abre de manera automática cuando se termina el ciclo de moldeo; un detector (microinterruptor o interruptor magnético) está adaptado para indicar cuando ocurre una apertura de la puerta. La salida de este detector está conectada por medio de un cable a una entrada en el controlador del robot cuyo programa requiere dicha entrada para activarse antes de iniciar la operación de descarga. Cuando el robot ha tomado la parte para sacarla de la máquina, el controlador inicia el ciclo de moldeo. En algunas insta-

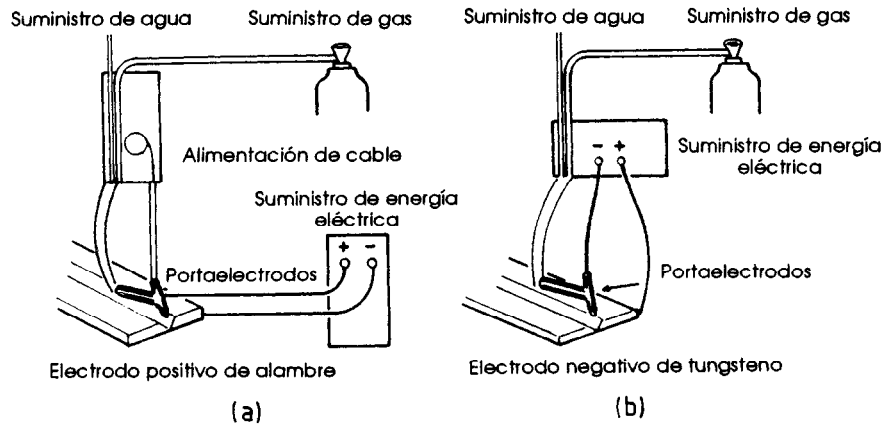
laciones, antes de iniciar el proceso de moldeo, el robot puede verificar que la parte se haya descargado de manera adecuada llevándola a un detector apropiado (este aspecto se describe en detalle en la sección 9.10). Esto ayuda a evitar que el molde trate de cerrarse sobre algún pedazo de material sólido de la operación anterior que pudiera haber quedado atorado en la cavidad. Se requieren interruptores de seguridad similares para la interfase con una prensa de corte o con cualquiera otra máquina en la cual la parte se descargue posteriormente.

#### 9.4 Soldadura por arco

En la soldadura por arco, la pieza de trabajo y un electrodo que se sostiene a cierta distancia de la pieza de trabajo, forman parte de un circuito eléctrico que se completa cuando un arco cruza la separación entre la pieza y el electrodo. El calor para fundir el metal se genera con el arco. Los procesos de soldadura por arco se clasifican como de electrodo consumible y de electrodo no consumible. Los dos procesos usados con mayor frecuencia en situaciones de soldadura con la ayuda de robots son el de arco con gas inerte y electrodo metálico (MIG) y el de arco con gas inerte y electrodo de tungsteno (TIG); ambos caen respectivamente en estas clasificaciones. Como sus nombres implican, ambos procesos se basan en la utilización de un gas.

Los elementos de un sistema de arco con gas inerte y electrodo metálico de soldadura se muestran en la figura 9.5(a). El electrodo es positivo y fuerzas magnetodinámicas transportan las gotas de metal fundido desde éste a través del arco para llenar el orificio de soldadura. El alambre de aporte que constituye el electrodo se consume y debe reabastecerse en forma automática. Este procedimiento es en particular adecuado para una operación automática dado que se mantiene un arco constante si el alambre se alimenta a una velocidad constante. La cantidad de alambre fundido en un tiempo dado (*velocidad de consumo*) depende de la corriente del arco, la cual a su vez depende del potencial al que se establece el arco. Si la velocidad de consumo es menor que la velocidad de alimentación del alambre el extremo del electrodo se aproxima a la pieza de trabajo. Esta disminución en el espacio de separación del arco causa una caída de potencial y, por lo tanto, un aumento en la corriente a través del circuito. De esta forma, la velocidad de consumo aumenta hasta que se restablece la dimensión de equilibrio del espacio libre del arco. Las características esenciales de un arco estable son, por lo tanto, una velocidad constante de alimentación del alambre y una fuente de energía con una característica negativa.

El alambre se toma de un rollo con precarga de fricción para evitar que se afloje durante el desenrollado. El alambre entra al extremo del alimentador de electrodo desde un tubo de cobre y al hacer contacto con éste, completa el circuito eléctrico. El gas se introduce alrededor del



**Figura 9.5** Soldadura por arco: (a) gas inerte y electrodo metálico (MIG), (b) gas inerte y electrodo de tungsteno (TIG).

electrodo y, para corrientes superiores a aproximadamente 250 A, la boquilla de gas se enfría con agua. Se pueden manejar corrientes de hasta 700 A con la soldadura con gas inerte y electrodo metálico.

El equipo para soldadura con gas inerte y electrodo de tungsteno se muestra en la figura 9.5(b). Para corrientes menores a 100 A se puede utilizar un electrodo positivo (esto es deseable ya que existe una acción inherente de limpieza en la pieza de trabajo), aunque también es común encontrar un electrodo negativo de tungsteno. La relación arco-potencial/separación se ve afectada por la forma del electrodo, que por lo general tiene la forma de un cono; el ángulo de dicho cono lo determina el intervalo de corriente por utilizar. Si se requiere la acción de limpieza de un electrodo positivo a corrientes superiores a 100 A (las cuales fundirían y, por consiguiente, consumirían el electrodo), es posible utilizar fuentes de corriente alterna. La soldadura con gas inerte y electrodo de tungsteno es un proceso versátil: las corrientes pueden ir de 0.5 A a 25 A cuando se utilizan portaelectrodos enfriados por aire para soldar metal delgado con un electrodo negativo; un suministro de energía de 25 A a 350 A es adecuado y es posible emplear hasta 800 A cuando se utilizan un electrodo negativo y un portaelectrodos enfriado por agua para soldar placas gruesas de metal. Si se requiere metal de aporte en un proceso de soldadura con gas inerte y electrodo de tungsteno, éste se suministra por medio de un alambre de aporte que se introduce directamente en el charco de soldadura.

La soldadura con gas inerte y electrodo de tungsteno está recubierta por un flujo de gas inerte, o nitrógeno, o una mezcla de ellos. Las opciones más comunes son el argón y el helio y se requiere una pureza de cuando menos 99.5%. En la soldadura con gas inerte y electrodo metálico también puede encontrarse bióxido de carbono además de los gases mencionados.

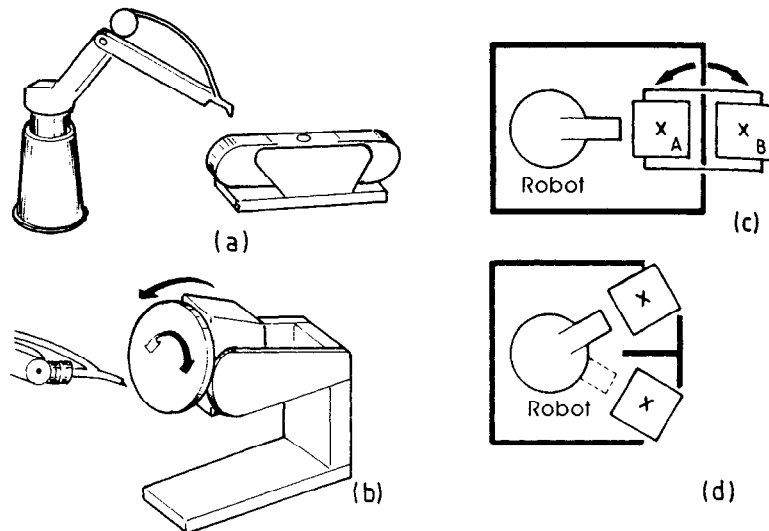
En la figura 9.6(a) se muestran las principales características de una estación robot para soldadura con electrodo metálico para soldar componentes de acero. Se han identificado seis elementos en un sistema robot de soldadura por arco (Nally, 1983):

- Robot (manipulador, unidad de alimentación y controlador)
- Equipo de soldadura (fuente de poder, alimentador de alambre, interfase con el portaelectrodos, cables)
- Dispositivo para colocación de la pieza de trabajo (una o más mesas)
- Dispositivo para sujeción de la pieza de trabajo (tenazas y accesorios)
- Ingeniería de los sistemas (programa y procedimientos de soldadura)
- Metal de aporte

Cada uno de estos elementos requiere cierta consideración adicional.

Como en el caso de la soldadura por puntos, puede hacerse la observación general de que, en teoría, cinco grados de libertad son suficientes para la soldadura de arco (el electrodo puede rotarse sobre su eje sin afectar la operación de soldadura), pero seis grados de libertad resultan más prácticos. Se utilizan tanto manipuladores eléctricos como hidráulicos para la soldadura de arco. Como no se requieren velocidades muy elevadas, con frecuencia se producen modelos para soldadura de manipuladores estándar en los cuales se sacrifica la velocidad a favor de mejoras en la precisión y la repetibilidad. La enseñanza puede llevarse a cabo guiando al robot a lo largo de la trayectoria; en este método, el portaelectrodos se mueve manualmente sobre la ruta de soldadura, que luego repite el robot. La mayoría de las soldaduras se realizan sobre uniones rectas o circulares; y por esto, es útil un control punto a punto con interpolación (véase el capítulo 7), ya que sólo es necesario enseñar al robot los puntos finales de cada unión en el caso de una línea recta o tres puntos en el caso de un círculo. En su forma más simple, la comunicación entre el controlador del robot y el equipo de soldadura consiste en una señal digital enviada al controlador de soldadura para indicar el inicio y la terminación de la operación de soldadura. Los parámetros del proceso de soldadura, como la velocidad de alimentación del alambre, la corriente, la velocidad de flujo del gas y los puntos de encendido y apagado del flujo de gas con respecto al encendido y apagado de la corriente, se debe de terminar y fijar por anticipado y los controla el equipo de soldadura.

Por lo que respecta al equipo de soldadura, la fuente de poder y el depósito de gas están montados en el piso; cables o tubos flexibles montados en el brazo del manipulador o tomados de la parte superior suministran al portaelectrodos la corriente, el gas y el agua de enfriamiento necesarios. El alambre de aporte debe ser flexible para permitir la alimentación desde



**Figura 9.6** Soldadura por arco en la que se utiliza un robot: (a) con una mesa giratoria, (b) con un posicionador con dos grados de libertad, (c) mesa giratoria que se carga en forma manual, (d) configuración con dos mesas para carga manual.

un rollo; además, es deseable mantener reducida la distancia entre el rollo y el portaelectrodos para evitar que el alambre se tuerza. Por lo general, resulta práctico montar el alimentador de alambre cerca del codo del manipulador. El portaelectrodos puede acoplarse a la muñeca por medio de un eslabón de madera, plástico o metal diseñado para desprenderse bajo una presión excesiva. Esta es una precaución contra la posibilidad de dañar el portaelectrodos si alguna falla hace que éste se quede soldado a la pieza de trabajo.

Los dispositivos para la colocación de la pieza de trabajo tienen dos funciones:

- Al hacer que gire la pieza de trabajo sobre dos o más ejes, añaden efectivamente grados de libertad adicionales a la combinación del manipulador y el colocador.
- Los dispositivos con mesas múltiples permiten el intercambio de trabajo entre el robot y el operador humano.

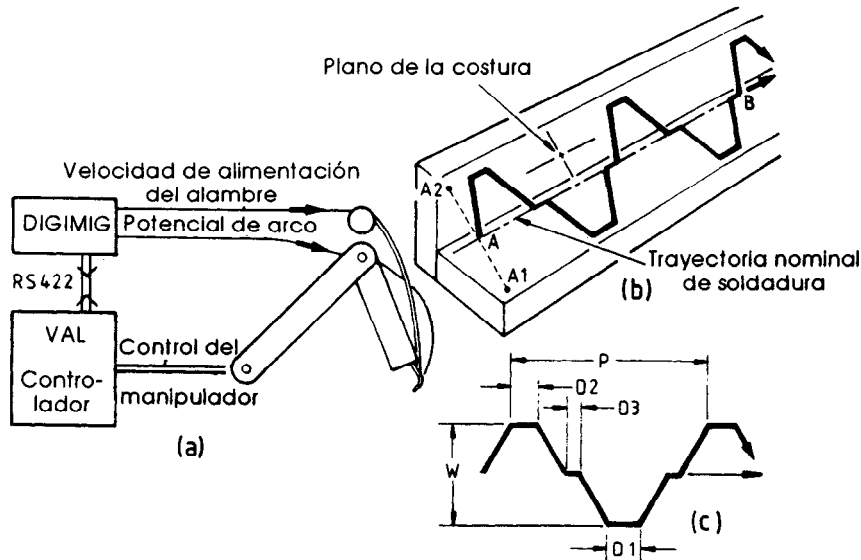
En la figura 9.6(b) se muestra un posicionador de dos ejes; cuando este posicionador está asociado a un sistema con cinco grados de libertad, se obtienen dos grados de libertad adicionales. El posicionador se controla con la computadora del robot y por lo general no está en movimiento durante la operación de soldadura; en cambio, se lleva a posiciones discretas para cada unión. Esto significa que, por ejemplo, pueden realizarse con

facilidad soldaduras internas alrededor de la base de una caja rectangular. Esto no sería posible desde una sola posición, incluso para un manipulador con seis grados de libertad.

Para obtener un máximo de rendimiento en las operaciones de manufactura por lo general se requiere utilizar al máximo el equipo de capital; esto también resulta aplicable a la soldadura. Se asegura que los sistemas robot reducen enormemente el tiempo de soldadura en comparación con los sistemas manuales o semiautomáticos, pero esto depende de la minimización del tiempo muerto del robot que ocurre durante las operaciones de carga y descarga.

En las figuras 9.6(c) y (d) se muestran dos métodos para coordinar las operaciones de carga y descarga por un operador en una operación de soldadura manejada por un robot. Con la configuración de mesa doble mostrada en la figura 9.6(c), el robot suelda una unión en una parte sobre la mesa A, mientras el operador carga la mesa B. Cuando se concluye la soldadura, la computadora del robot espera una señal de algún botón o interruptor de pie que oprime el operador para indicar que la operación de carga se ha terminado. La mesa, que está directamente bajo el control del robot, gira 180° y cuando los sensores indican que se ha terminado esta rotación se inicia de nuevo la operación de soldadura. Mientras tanto el operador está libre para descargar la parte terminada y cargar una nueva pieza de trabajo. Pueden existir algunas variaciones a este arreglo: existen mesas de cuatro posiciones y si la relación del tiempo de carga al tiempo de soldadura lo permite, un operador puede alimentar a más de un robot. Es particularmente sencillo supervisar la configuración de un robot y una mesa giratoria (requisito para cualquier operación de soldadura con arco), encerrando toda la celda con una pantalla fija. Las dos mitades de la mesa giratoria están divididas por una pantalla fija al centro de la mesa giratoria, que se cierra cuando se está llevando a cabo una operación de soldadura.

Se ha mencionado que tanto a la corriente, como al flujo del gas y a la velocidad de alimentación del alambre las controla el equipo de soldadura y, por lo general, se determinan y ajustan en forma anticipada. Esto resulta satisfactorio si todos los parámetros son aceptables para todas las soldaduras en una misma pieza de trabajo, pero carece de versatilidad en caso de que, por ejemplo, se requieran dos velocidades distintas de alimentación de alambre para una misma operación. Se han desarrollado sistemas para brindar al robot un control más directo sobre los parámetros de soldadura; un ejemplo característico es el de los robots Puma, denominados Sistema Puma de Soldadura por Arco (*Puma Arc Welding System, PAWS*) (Pavone, 1983). Los elementos del sistema se muestran en la figura 9.7(a). El VAL es el lenguaje de control del robot Puma y el DIGIMIG es un sistema de soldadura exclusivo. El controlador de soldadura se ha modificado para permitir su interfase con el VAL a través de un enlace RS422 (un enlace digital de comunicaciones en serie).



**Figura 9.7** Sistema robot para soldadura por arco: (a) sistema PAWS, (b) ruta real de la unión con soldadura, (c) dimensiones especificables en el movimiento de costura.

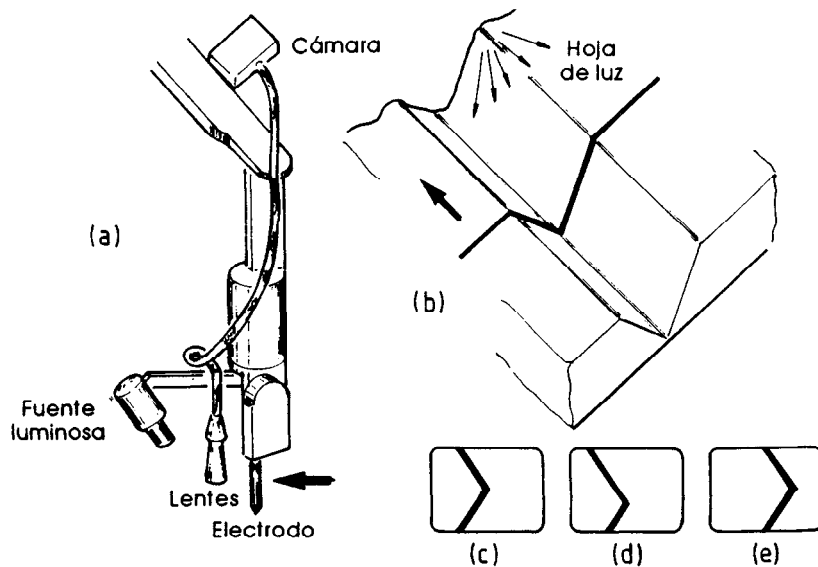
El VAL utiliza comandos parecidos al inglés para programar el robot; por ejemplo, para moverlo en línea recta hasta un punto ya enseñado identificado como W1, la instrucción correspondiente sería MOVES W1. Se han incorporado al VAL instrucciones adicionales para una situación de soldadura. DIGIMIG incluye sistemas de control de malla cerrada para mantener la velocidad adecuada de alimentación de alambre y el potencial del arco; los puntos de referencia de estos sistemas de control se reciben desde el control del robot. Cualquier error, por ejemplo, las pérdidas de corriente, se comunican de regreso al control del robot, en donde se interpreta y se despliega al operador. En el controlador del robot se pueden definir distintos conjuntos de parámetros de soldadura, que luego se pueden consultar según sea necesario. Por ejemplo,

WELDSET 1 = 425, 29.4

define una velocidad de alimentación del alambre de 425 pulgadas/minuto (una unidad comúnmente usada en soldadura) y un potencial de arco de 29.4. Si el portaelectrodos se encuentra en una posición W1, entonces las instrucciones

WELDSET 1, 18  
MOVES W2

llevan a cabo la soldadura de acuerdo con los parámetros antes definidos en una línea recta de W1 a W2 a una velocidad de 18 pulgadas/minuto. Si



**Figura 9.8** Soldadura por arco con un robot guiado por un sistema de visión: (a) montaje de la fuente luminosa y la cámara, (b) intersección del plano de luz con la pieza de trabajo, (c) costura sobre la línea nominal, (d) costura a la izquierda de la línea nominal, (e) costura alejada de la línea nominal.

la alimentación del alambre y el arco se detuvieran inmediatamente después de detenerse el desplazamiento se dejaría un cráter al final de la soldadura; este cráter se rellena al continuar con la soldadura durante un corto tiempo mientras el portaelectrodos permanece fijo. Por ejemplo,

CRATERFILL 0.75, 2

WELDEND

termina una soldadura llenando el cráter durante 0.75 segundos de acuerdo con los parámetros especificados por WELDSET 2 (los cuales no tienen que ser los mismos que los definidos para la soldadura misma).

Para soldaduras nominalmente rectas, con frecuencia se obtienen mejores resultados si se realiza, con el portaelectrodos, un movimiento de costura sobre la unión. En la figura 9.7(b) se muestra como la trayectoria de costura se relaciona con una ruta nominal para un llenado de soldadura. El sistema PAWS permite la definición del paso  $P$ , las dilataciones,  $D1$ ,  $D2$  y  $D3$ , el ancho  $W$  y el plano  $A1-A-A2-B$  a través de programación y enseñanza (figura 9.7(c)). Los robots sin sensores requieren una preparación de la soldadura de mayor calidad que los sistemas manuales. No pueden, por ejemplo, compensar desviaciones en el ancho o la posición de la costura a partir de los valores programados. En el capítulo 8 se indicó



que existe un número creciente de robots de segunda generación o con sensores que tienen la habilidad para resolver este tipo de desviaciones. Se utilizan diversos tipos de sensores, entre los que se incluyen los táctiles, los ópticos y los eléctricos. En esta sección se consideran dos sistemas. Se ha descrito un sistema óptico (Kremers y colaboradores, 1983) que utiliza luz estructurada, en este caso un solo rayo de luz, para iluminar la costura adelante del portaelectrodos de soldadura. La visión se recaba con un lente, como se muestra en la figura 9.8(a) y se pasa a través de un haz de fibras ópticas hasta una cámara. El procesamiento de la escena por medio de una computadora indica una desviación de la costura a partir de la ruta deseada y esta información se transmite al robot de manera que pueda tomarse la acción correctiva necesaria.

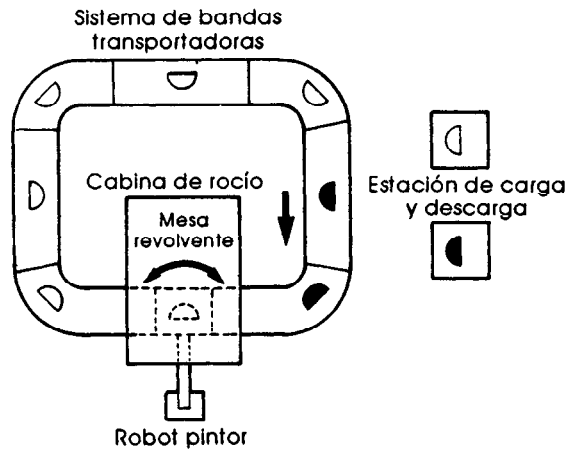
En la figura 9.8(b) se muestra cómo se ilumina la costura con el rayo de luz y las figuras 9.8(c), (d) y (e) muestran la vista de una costura que ha de llenarse con filetes de material con la costura respectivamente sobre la línea nominal, a la izquierda de la línea nominal y más alejada que la línea nominal. Puede verse que la posición de la línea sobre la pantalla, que representa una vista sobre un plano de la línea de intersección entre el rayo de luz y las superficies de las partes por soldar, indica el tipo y la magnitud de la desviación. Los problemas en estos tipos de sistemas incluyen el humo que oscurece tanto la iluminación generada por la fuente como la vista de las cámaras y la presencia de luz no controlada proveniente de las chispas, salpicaduras y reflexiones.

Estos problemas se resuelven mediante el empleo de una fuente poderosa de iluminación y algoritmos especiales para procesamiento de imágenes que aíslan la línea de interés de otros puntos luminosos en la imagen.

En el proceso de soldadura por arco, existe una relación conocida entre el potencial del arco y su longitud. Este hecho se ha usado para desarrollar un sistema sensorial que deduce la forma geométrica de la costura a partir de la variación en el potencial del arco conforme el portaelectrodos hace el movimiento de costura (Cook, 1983). Si la costura está exactamente sobre la línea nominal, el potencial del arco varía en forma estable conforme se mueve el portaelectrodos; una desviación se refleja como un desbalance en las variaciones de potencial; éstas pueden interpretarse al conocer la relación entre el potencial del arco y su longitud, como una corrección de distancia que se debe transmitir al control del robot.

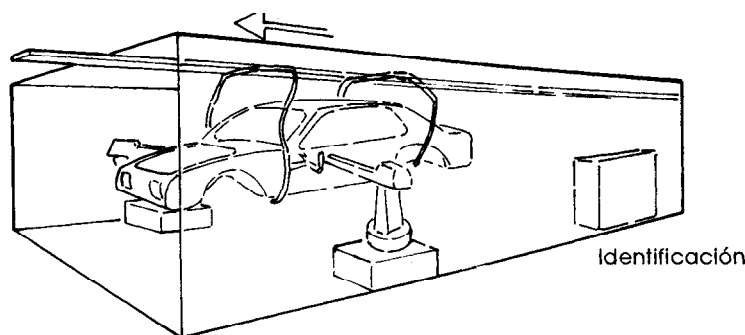
### **9.5 Revestimiento de superficies**

Esta categoría de aplicación incluye operaciones como el pintado, el esmaltado, la aplicación de selladores en la parte inferior de carrocerías automotrices y el electrorecubrimiento metálico. En el revestimiento de superficies se utiliza por lo general una programación por enseñanza directa, dado que la operación puede reproducirse con facilidad en forma manual, pero no puede definirse fácilmente en términos numéricos.



**Figura 9.9** Sistema robot de recubrimiento con esmalte que se carga en forma manual.

Una aplicación común es en el esmaltado de lavabos (Warnecke y Schraft, 1982), que se muestra en la figura 9.9. Una banda transportadora que se carga en forma manual, se hace girar bajo el control de la computadora del robot. En la zona de pintura el robot tiene control sobre una mesa que gira 180° para tener acceso a ambos lados de cada pieza de trabajo. El área para pintar está protegida por una cabina de rociado que tiene dos propósitos: los operadores quedan protegidos contra el rocío de esmalte y el esmalte que no se queda en las partes se recolecta y se recicla. En esta aplicación, el robot es una máquina impulsada por medios hidráulicos; está construido específicamente para aplicaciones de recubrimiento de superficies. Esto es común en el campo de la pintura, en donde ni la capacidad para transporte de cargas y ni la precisión de un robot para fines generales son tan necesarias. Aun así, los robots para pintura deben contar, además de la enseñanza directa, con un gran alcance y con la habilidad para sincronizar sus movimientos con los de la banda transportadora. La operación de pintar carrocerías automotrices sirve para ilustrar la necesidad de esta sincronización (figura 9.10) (Akeel, 1982). Las carrocerías automotrices de distintos diseños llegan al azar, colgadas de una banda transportadora suspendida en movimiento constante. Antes que nada, un sistema de visión artificial identifica cada parte y comunica la información a una computadora central de supervisión; ésta carga el programa adecuado en cada robot. Debido a que cada programa individual de pintura se enseña al robot sobre un modelo estático, es necesario seguir el movimiento de la línea, dado que ésta no se mueve a una velocidad precisa; además, es necesario modificar el programa para seguir la parte. (Este aspecto se estudia en detalle en la sección 7.2). Debe notarse que toda la operación de pintar está contenida en una gran cabina de pintura que protege a los operadores contra la pintura rociada y facilita el reciclamiento del material



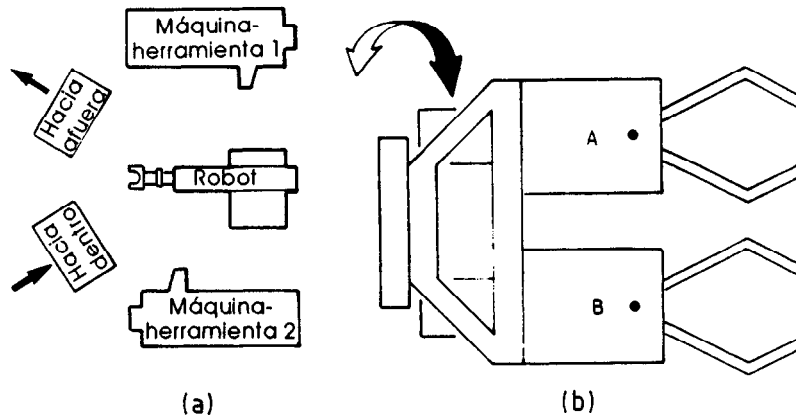
**Figura 9.10** Cabina para pintar automóviles mediante rocío por medio de robots en una banda transportadora suspendida con movimiento constante e identificación de partes.

de pintado. El material para pintar puede ser un rocío líquido o en polvo; si el rocío cuenta con la carga electrostática se facilita la adherencia a la parte si ésta se conecta a una tierra eléctrica; con esto se reduce el desperdicio de material rociado a aproximadamente un 5%. En esta instalación particular, los programas se enseñan a los robots utilizando un robot idéntico instalado en otro lugar de la planta que trabaja con partes estacionarias. Esto permite la verificación de los programas sin necesidad de interrumpir el funcionamiento del equipo de producción. Los programas también pueden enseñarse por medio de un brazo para enseñanza, pero esto requiere la utilización de una máquina en producción para verificar el programa.

### 9.6 Servicio a máquinas herramienta

El uso eficiente del equipo de capital es un tema recurrente en la discusión de los usos de los robots; el área de servicio a máquinas herramienta no es una excepción. El uso eficiente de una máquina herramienta requiere que ésta se cargue y descargue en la forma más rápida posible, de manera que las operaciones de maquinado se lleven a cabo con un mínimo de tiempo muerto. El uso de un robot para las operaciones de carga y descarga, mientras la máquina herramienta se utiliza a toda su capacidad, puede, incluso, redundar en una cantidad enorme de tiempo muerto para el robot. Este dilema se resuelve con la colocación del robot en una celda de trabajo. El ejemplo que se muestra en la figura 9.11(a) incluye dos lijadoras con control numérico (Gandy, 1983), así como bandas transportadoras de entrada y salida para las partes nuevas y terminadas, respectivamente. La carga y descarga de ambas máquinas mantiene al robot ocupado por completo.

Gran parte de la inspección inherente a la interacción entre el operador humano y la máquina con control numérico debe formalizarse para la



**Figura 9.11** Celda de trabajo para un robot: (a) distribución de la maquinaria, (b) tenazas dobles.

operación del robot. Considérese, por ejemplo, el servicio de un torno con control numérico. Un operador sabrá, al observar un foco, que ya se ha completado el torneado de una parte, entonces abrirá la puerta protectora, tomará la parte y soltará las mordazas que sostienen la parte. Después insertará una nueva parte, asegurará las mordazas, cerrará la puerta e iniciará el torneado apretando un botón. Ciertas acciones de inspección y corrección están implícitas en la operación; por ejemplo, será necesario limpiar con un cepillo la viruta que obstruya las mordazas antes de colocar la parte nueva.

Una operación llevada a cabo por un robot en la misma máquina debe definirse en forma más precisa. En su forma más simple, la comunicación entre cada máquina con control numérico y el robot puede realizarse por medio de entradas y salidas digitales. El ciclo de operaciones entre el robot y el torno con control numérico podrá ser entonces:

- 1) señal del torno al robot para indicar la terminación del torneado.
- 2) señal del robot al torno para abrir la puerta.
- 3) el robot espera la indicación del sensor de que la puerta se ha abierto sin problemas.
- 4) el robot sujeta la parte, monitoreando los sensores de las tenazas para asegurar que la pieza se ha sujetado en forma adecuada.
- 5) señal del robot al torno para liberar las mordazas.
- 6) el robot espera la indicación del sensor de que las mordazas se han abierto sin problema.
- 7) la parte se retira y se lleva a la siguiente operación (otra máquina o una banda transportadora).
- 8) señal del robot al torno para activar un chorro de aire para eliminar la viruta.

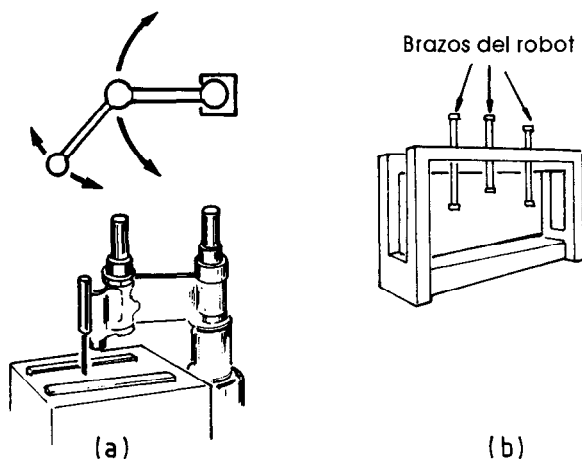
- 9) se toma una parte nueva, los sensores de las tenazas se monitorean de nuevo y la parte se coloca en las mordazas.
- 10) señal del robot al torno para cerrar las mordazas.
- 11) el robot espera la señal que le indica que las mordazas se han cerrado sin problema.
- 12) las tenazas se sueltan y se retiran.
- 13) señal del robot al torno para cerrar la puerta.
- 14) el robot espera la indicación de que la puerta se ha cerrado.
- 15) señal del robot al torno para iniciar la rotación.

Incluso una sencilla operación de carga y descarga consiste en seis señales digitales del robot al torno y seis señales en dirección opuesta (incluyendo los sensores de las tenazas). Una característica clave de muchas aplicaciones de servicio a máquinas herramienta la constituyen las tenazas dobles. En la figura 9.11(b) se muestra este dispositivo para partes cilíndricas, el cual consiste en dos tenazas idénticas dispuestas a  $180^\circ$  una de la otra, montadas directamente sobre la placa de la muñeca de un robot con seis grados de libertad, o a un robot con cinco grados de libertad por medio de un mecanismo con una rotación de  $180^\circ$ . Considérese una nueva parte sujeta en las tenazas A. El robot puede descargar el torno con las tenazas B. La muñeca entonces se gira  $180^\circ$  con el fin de presentar la nueva parte en las tenazas A a las mordazas. De esta forma la carga y la descarga se llevan a cabo en una misma operación, con lo que se minimiza así el tiempo improductivo de la máquina.

Las mordazas de tres cuñas son autocentrantes, de manera que puede resultar impráctico montar las tenazas directamente sobre la placa de la muñeca; una ligera desalineación en las tenazas puede resultar en que las mordazas traten de forzar al robot fuera de posición. Es por esta razón que en ocasiones las tenazas se montan sobre enlaces de resorte o hule. Se requieren robots eficaces para las operaciones con tenazas dobles, dado que el manipulador debe soportar el peso de todo el mecanismo de sujeción y de dos piezas de trabajo.

## 9.7 Ensamble

Aun cuando no se trata de la aplicación más común de los robots, las operaciones de ensamble, dada su elevada utilización de mano de obra, son la aplicación con mayor potencial de desarrollo. El ensamble manual se clasifica con frecuencia como una operación “no calificada”, pero en lo que respecta al empleo de robots, es una operación complicada ya que requiere retroalimentación generada por sensores. Los robots de la primera generación no tuvieron mucho impacto sobre la automatización de las operaciones de ensamble, pero las máquinas más recientes, con su gran precisión y mejor acondicionadas para procesar datos generados por sensores, están remediando esta situación.



**Figura 9.12** Configuración de robots para ensamble: (a) manipulador SCARA, (b) sistema de brazos múltiples suspendidos.

En el capítulo 2 se describió el grado de cedencia con centro remoto (RCC) y su uso en tareas del tipo de la inserción de una clavija en un orificio. Este principio se ha extendido en el brazo de robot para ensamble con grado de cedencia selectivo (*Selective Compliance Robot Arm*, SCARA) (Makino y Furuya, 1982), que es una configuración en particular adecuada para el manipulador de un robot para ensamble. En su forma original el SCARA contaba con cuatro motores: la posición de las articulaciones del hombro y del codo definían las coordenadas de la muñeca en el plano horizontal y dos motores en la muñeca controlaban la orientación y la elevación del efector final. Al contar con cuatro grados de libertad, la máquina estaba restringida a operaciones de ensamble sobre una mesa con desplazamientos verticales y horizontales. Una característica exclusiva de la configuración SCARA es que el grado de cedencia puede controlarse - *grado de cedencia selectivo*. Como los brazos del manipulador son relativamente rígidos, el grado de cedencia derivado en las articulaciones puede controlarse al alterar los parámetros del sistema para control de las coordenadas de la máquina. La configuración SCARA permite una rotación continua de la muñeca, lo que hace que resulte adecuada para tareas de perforación e inserción de tornillos sin necesidad de motores adicionales. En realidad, uno de los primeros usos del Picmat SCARA fue la inserción y apriete de los diversos tornillos del ensamble del bastidor de una puerta (figura 9.12(a)).

Otra configuración de robot que ha resultado útil para el trabajo de ensamble es una disposición de armaduras suspendidas. Un ejemplo (figura 9.12(b)) es el robot SERIE 3 de Olivetti, que puede ser una máquina con varios brazos. Las máquinas pueden agruparse sobre una banda transportadora; las piezas de trabajo por lo general se montan en plataformas

estándar que se sujetan para lograr una ubicación precisa en cada estación de ensamble. Algunas de las aplicaciones citadas para este robot (Ruder, 1982), por ejemplo, conectores electrónicos, cubiertas de motores, válvulas de inyección, caracterizan muchas tareas de ensamble donde las partes por ensamblar consisten en partes o subensambles de gran tamaño que llegan en una plataforma proveniente de operaciones previas, y pequeñas partes para fijación de los componentes, por ejemplo, tornillos o rondanas. Con frecuencia se ha encontrado que resulta práctico suministrar a la estación de trabajo las partes y subensambles de gran tamaño en plataformas. Las partes pequeñas como tornillos pueden manejarse en forma más adecuada por medio de alimentadores de cubo y depósitos. La detección es una característica esencial para lograr un ensamblaje adecuado; un ejemplo es en la operación de insertar un tornillo, en la cual el robot debe ser capaz de detectar que el tornillo se ha sujetado de manera adecuada, que algún desarmador neumático se ha atorado, que haya alguna cuerda macho o hembra barrida, etc. Estas operaciones de detección se dan por hechas en un sistema manual, pero en un sistema automático requieren sensores e instrucciones apropiadas para el equipo y los programas.

### 9.8 Empaque y acomodo

Un estudio de las aplicaciones actuales en el campo del empaque y acomodo revela el manejo de una gran variedad de materiales o partes, así como muchas formas distintas en las que dichas partes se acomodan o presentan al robot. La complejidad de los robots utilizados varía desde dispositivos de selección y colocación con dos grados de libertad hasta robots con rutas controladas con seis grados de libertad. Una característica sobresaliente de todas las aplicaciones de empaque la constituyen las tenazas de propósito especial; surgen, además, dos categorías de aplicaciones: puede ser que las partes se presenten al robot en una forma conocida y ordenada o que el método de presentación sea, en cierto modo, aleatorio.

Con frecuencia se requieren tenazas de propósito especial para este tipo de aplicaciones. Considérese el ejemplo de unas tenazas de vacío de gran tamaño. Unas bolsas de papel que contienen gránulos de plástico llegan sobre una banda transportadora a intervalos variables y se requiere que el robot las apile en una charola. Es difícil manejar las bolsas por medios mecánicos ya que no son rígidas y una fuerza excesiva podría dañarlas. Cuando el aire se evacúa de un contenedor flexible de partículas sueltas, el empaque se torna bastante rígido; este fenómeno se aprovecha plenamente en esta situación. Cuando una bolsa llega al extremo de la banda transportadora hace contacto con un interruptor que indica al robot que mueva las tenazas de vacío hasta donde se encuentra la bolsa. El vacío se aplica entonces el tiempo suficiente para que la bolsa se ponga rígida, lo que permite que ésta se sujete y se levante sin problema.

Es posible que no siempre se justifique la automatización de una aplicación de empaque o acomodo por sí misma, pero cuando se ha introducido un robot en alguna parte del proceso de manufactura, resulta relativamente económico extender sus actividades al acomodo de partes al final del proceso. En este contexto es posible encontrar muchas aplicaciones del acomodo; Campbell y colaboradores, 1984, han citado un ejemplo de ellas. En el ejemplo, las partes de un transformador se toman de una banda transportadora y se colocan en una máquina de recubrimiento; en ésta, la parte se hace girar con el robot bajo un aplicador de sellador epóxico. El robot coloca la parte en un horno para permitir el curado del sellador; las partes terminadas se sacan del horno y apiladas en forma ordenada.

La capacidad para reubicar secuencias acelera la enseñanza de operaciones de acomodo. Si las partes se tienen que apilar en capas idénticas, no es necesario enseñar al robot la posición de cada parte en la pila en forma individual; en cambio, será suficiente con enseñarle una de las capas y programar las alturas de todas las capas; la secuencia de carga de una capa puede entonces transferirse a la siguiente posición en la parte superior conforme se completa cada capa. Las variables se definen durante el programa como una memoria de la posición actual, de manera que el robot pueda dejar en cualquier momento la secuencia de apilado para atender otras máquinas de la celda y regresar a su posición inicial para continuar apilando las piezas.

Un transportador de charolas asegura la operación continua de una operación de acomodo. Una plataforma se carga mientras una plataforma vacía espera en otro riel. Cuando la primera plataforma está llena, se inicia la carga de la segunda plataforma y, si la plataforma llena se reemplaza por una vacía antes de llenarse la segunda, la operación de la celda no tendrá que interrumpirse.

### **9.9 Operaciones con prensas**

Son tres las principales operaciones que pueden llevarse a cabo prensando: corte, conformación y ensamble. Las primeras dos están confinadas a producir componentes a partir de metal laminado, mientras que la tercera abarca una gran variedad de componentes. Una operación de prensado requiere la aplicación de una fuerza de compresión, por lo general en sentido vertical, por medios mecánicos o hidráulicos. El papel del robot en las operaciones con prensas es en esencia el de cargador y descargador.

Primero se resumen las operaciones de prensado en que resulta aplicable el uso de un robot. Las operaciones de recorte y perforación se distinguen entre sí por el hecho de que un recorte consiste en cortar el perfil de una parte y la perforación implica cortar orificios en una parte. Un punzón se fuerza contra la placa metálica, con lo que se realiza un corte de acuerdo con la forma de un dado estacionario. La placa de liberación separa la placa del punzón en el golpe de retroceso. Debe considerarse también el



proceso de conformación. El doblado produce uno o más dobleces sobre un mismo eje a todo lo largo de la placa; el ajuste de la herramienta se hace por lo general a unos cuantos grados adicionales con respecto al ángulo deseado con el fin de tomar en cuenta la ligera recuperación elástica al liberar la parte. Si se sujeta la placa por medio de tenazas, puede utilizarse una prensa para alargar la forma del material y, en caso de ser necesaria una deformación adicional, puede recurrirse al proceso de estirado profundo. Diversas operaciones de ensamble resultan adecuadas para su ejecución por medio de prensas; un ejemplo característico es el ensamble de una rueda automotriz por medio de una maza y pernos, en donde los pernos se fuerzan en la maza por medio de una prensa.

Es posible atender herramientas de prensado utilizando solamente tres grados de libertad. Lo anterior requiere que el robot se coloque en la posición adecuada con respecto al dado y a la placa a ser sujeta con una orientación correcta de la herramienta (el eje de rotación debe ser normal a la placa). Ocasionalmente se encuentran tenazas mecánicas en este tipo de aplicación, pero en los trabajos de prensado es mucho más común el uso de tenazas de vacío o magnéticas.

Las máquinas de prensado que se atienden en forma manual requieren interacciones de seguridad muy completas. El pistón no debe comenzar su desplazamiento sino hasta que se opriman los dos interruptores de un dispositivo de seguridad manejado a dos manos y hasta que la pantalla protectora haya bajado por completo. Si la celda del robot está protegida en forma adecuada es posible eliminar algunas de las precauciones inherentes a la operación de una prensa; aun así, se requiere una interacción adecuada para asegurar que no se inicie la operación de prensado hasta que las tenazas hayan librado la máquina y que el robot no se acerque a la máquina sino hasta que el pistón se haya retraído completamente. Se requieren sensores en las tenazas para comprobar que tanto los productos como el material de desperdicio se han retirado por completo del dado.

Las partes producidas por medio de prensas con frecuencia requieren más de una operación, por lo que es común que una prensa flexible dé cabida a más de un dado para realizar operaciones sucesivas en cada parte. La tendencia actual es hacia máquinas flexibles que ofrecen un sistema por completo automatizado que maneja varias operaciones, además de la habilidad para cambiar a lotes de productos diferentes sin necesidad de cambiar los dados en forma manual. Una máquina de este tipo incorpora un robot que acepta piezas de un alimentador automático que se eleva para mantener el nivel máximo de alimentación posible y carga y descarga cuatro dados en la prensa (Mizutame y colaboradores, 1984). Los dados pueden escogerse en forma automática de un grupo de 16 diferentes; se incorporan además bandas transportadoras para la recolección automática de productos y desperdicios.

Algunos problemas especiales se presentan durante el desempeño de operaciones de doblado. El doblado se lleva a cabo por medio de una prensa

de pie y, como es posible que en el proceso estén involucradas grandes láminas de metal, es importante asegurar que el robot pueda cargar y descargar la prensa de pie sin sufrir una colisión.

### 9.10 Fundición por inyección

La fundición por inyección a presión o inyección es un proceso para producir partes a partir de aleaciones de aluminio, magnesio o zinc, con alta precisión dimensional y buen acabado superficial. El metal fundido se fuerza a presión ( $25\text{--}200\text{ MN/m}^2$ ) en un molde y se permite que se enfríe y solidifique mientras se mantiene la presión. Considérense los elementos básicos de una máquina de troquelado. El metal fundido se obtiene de un depósito caliente; se mide una cierta cantidad de metal y se introduce en la cavidad formada entre dos dados o moldes. Después de que el metal solidifica, el dado móvil se retrae para revelar la fundición completa con su canal de inyección. La fundición se saca del molde, en ocasiones con auxilio de pernos de eyección o botadores y los dados pueden rociarse para limpiarlos y lubricarlos antes de la siguiente operación de troquelado.

Es común encontrar material excedente o rebaba en una pieza de fundición en bruto; esto ocurre cuando el metal fundido fluye entre las superficies planas de los moldes; este excedente se elimina por medio de una prensa de corte. Para fragilizar el excedente y que se facilite su eliminación, la fundición se sumerge en un líquido frío inmediatamente después de sacarlo de la máquina de inyección. Un canal de inyección puede alimentar más de una parte, en cuyo caso la prensa de corte también lleva a cabo la función de remover las partes del canal solidificado y los canales secundarios. La rebaba y los canales de inyección primario y secundario se realimentan a la máquina de inyección.

Considérese una celda de robots para inyección. La secuencia de las operaciones en un ciclo de la celda es:

- 1) se hace la fundición por inyección
- 2) se separan los moldes
- 3) el robot sujeta el canal de inyección solidificado y saca la parte de la máquina
- 4) un rociador limpia y lubrica el molde mientras el robot desplaza la parte
- 5) la parte se lleva a una estación sensora para su inspección; si la parte no presenta fallas se emite una señal a la máquina de fundición por inyección para que inicie una nueva operación
- 6) la parte se coloca en la prensa de corte
- 7) se hace funcionar la prensa de corte, se expulsan las partes mientras y el robot regresa, listo para ingresar a la máquina de inyección cuando se realice la siguiente operación de inyección

Existen necesidades similares en las operaciones de inyección a presión de metales y el moldeo por inyección, por lo menos en lo que se refiere a la interrelación con otra maquinaria. Después del corte las partes se llevan a una estación sensora, que consiste en un arreglo de interruptores para reflexión de luz infrarroja: el programa iniciará la elaboración de otra fundición, sólo si todos los interruptores detectan una presencia metálica, de lo contrario se activa una alarma. (Se puede tener acceso manual a los moldes desde el exterior de la celda). Un robot con una configuración de brazo articulado horizontal (similar a SCARA) que forma parte de una instalación permite que las máquinas se agrupen a poca distancia alrededor del robot. Las máquinas y barreras de seguridad forman una celda cerrada.

Es posible hacer algunas variaciones a la instalación descrita. Se ha encontrado que es posible operar dos máquinas de inyección con un sólo robot cuando los tiempos de ciclo lo permiten. Otra posibilidad es que, en lugar de tener una unidad de rociado automático independiente para limpiar los moldes, la pistola rociadora puede levantarse y activarse con las tenazas del robot. La rebaba que obtiene la prensa de corte puede reciclarse en forma automática a la máquina de inyección por gravedad usando una tolva, o empleando una banda transportadora. Es posible que no sea necesario rociar los moldes después de cada inyección, en cuyo caso se alimenta una instrucción al programa del robot para contar el número de ciclos de operación y emitir una señal para una operación de rociado a intervalos regulares.

### 9.11 Inspección

Existen muchas aplicaciones, como el ensamble, la soldadura por arco y la fundición por inyección a presión en donde la inspección es una parte necesaria e integral del proceso, que debe llevarse a cabo durante el ciclo de operación. Esta sección se ocupa de sistemas automáticos de inspección en donde los componentes esenciales son un robot, un sistema sensor automático y un medio de comunicación entre los dos. Los robots y los sensores deben instalarse juntos cuando es necesario transportar el sensor hasta la parte, o la parte hasta el sensor. Se ha visto ya una aplicación de este último caso en el ejemplo anterior de inyección. Al igual que el ensamble, la inspección abarca varios procesos y puede ilustrarse en forma más adecuada mediante el estudio de algunos ejemplos específicos.

Se ha empleado con éxito un robot para transportar un sensor ultrasónico que se usa en la inspección de partes de fibra de carbono compuesta fabricadas en la industria aeroespacial (Campbel y colaboradores, 1984). Este material está construido a partir de varias capas de material tejido con fibras de carbono que están unidas con una matriz de resina. Después de curado el material no deberán existir fisuras o burbujas de gas en la matriz, ni tampoco ninguna separación entre capas posteriores, conocida como delaminación. El método de prueba no destructivo para probar estas fallas

consiste en transmitir una señal ultrasónica a través del material; se identifica la presencia de fisuras o delaminaciones a partir del patrón de la señal atenuada recogida por un receptor en el otro lado del material.

La inspección de una parte compuesta requiere un barrido regular, por lo general en forma de rejilla; en el caso de partes relativamente planas, esto puede lograrse con facilidad con máquinas de tres ejes construidas con esta finalidad específica. Como es necesario mantener la cabeza de barrido normal a la superficie de la parte, se requieren cuando menos cinco grados de libertad cuando se trabajan partes curvadas, por lo que en este sistema se utiliza un robot para transportar la cabeza de barrido. Una configuración de calibrador para la montura de la cabeza permite el acceso a componentes profundos. La capacidad de los robots de primera generación con frecuencia puede mejorarse en gran medida si estos se conectan a una microcomputadora (Harris e Irvine, 1984); este ejemplo sirve para ilustrar el punto. No es necesario programar la ruta del robot por medio de la enseñanza, dado que se cuenta con información sobre el diseño de la parte en una base de datos de diseño asistido por computadora (CAD). La microcomputadora lleva a cabo dos funciones: recopila información de diseño del sistema de diseño asistido por computadora y la transforma en datos de coordenadas adecuados para su transmisión al robot y, además, interpreta la información del sistema ultrasónico para desplegar una representación bidimensional de la parte. La sincronización del sistema depende de las señales que el robot le envía a la computadora al inicio del barrido de cada línea para comenzar un muestreo de la señal del sensor. La computadora realiza el muestreo a una velocidad calculada para monitorear puntos a intervalos de 3 mm.

### **9.12 Resumen**

Las aplicaciones industriales para los robots en la actualidad son muchas y diversas; en este capítulo se han mencionado sólo algunas de las áreas más generalizadas. El control por una computadora es una parte esencial en la mayoría de los procesos, dado que es necesario tomar decisiones y comunicarse con otras máquinas. Existen sistemas robot construidos para fines específicos en aplicaciones como, el revestimiento de superficies; para otras aplicaciones las opciones son más extensas. Muchos procesos requieren un efector final de diseño especial y la capacidad para manejar sensores es fundamental en la aplicación de robots a tareas más complejas.

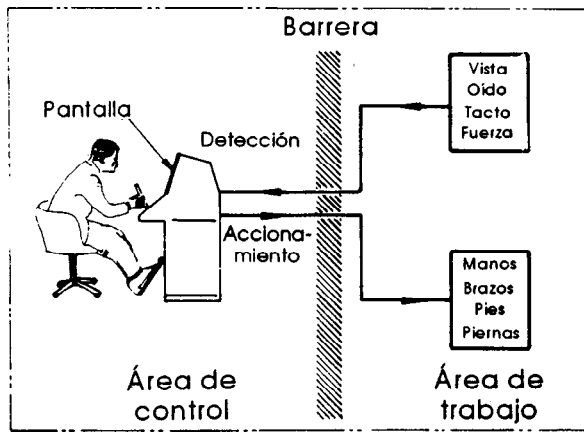
# Capítulo 10

## *Teleoperadores*

---

### 10.1 Introducción

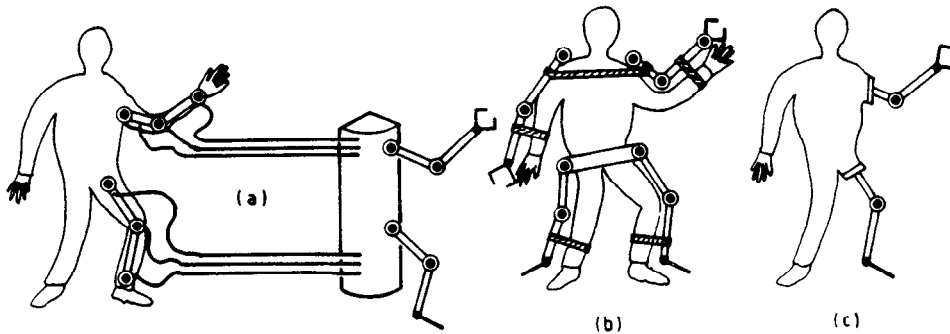
Existen muchas definiciones distintas para el término teleoperador y se han propuesto infinidad de nombres para estos dispositivos, incluyendo entre otros teleapéndices, telefactores, teletíteres y muchos otros más. Se espera no aumentar la confusión existente al dar una definición propia. Esta definición no es enteramente original sino que se trata de una definición híbrida, elaborada con base en las definiciones publicadas en el primer libro importante sobre el tema (Johnsen y Corliss, 1969) y en los informes de la *U.S. National Aeronautics and Space Administration*, NASA (Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio) (Onega y Clingan, 1972). La definición de este libro es que un teleoperador u operador teledirigido es un sistema cibernético humano-máquina diseñado para aumentar y ampliar los sentidos y la destreza humana. La figura 10.1 pretende aclarar esta definición. Las palabras se han seleccionado con todo cuidado. De “cibernético” se infiere el concepto de control y retroalimentación de la información. Su uso excluye a las máquinas preprogramadas, como las cafeteras, las básculas y los hornos con tiempos de cocimiento programables, e, incluso, a los robots industriales de la actualidad. El término “humano-máquina” destaca el hecho de que el elemento humano mantiene el control. Para que esto suceda, el operador necesita contar con información sobre lo que debe controlarse y ésta se obtiene por medio de la retroalimentación de los sensores en el área de trabajo que aumentan los sentidos humanos. Por último, “destreza” significa habilidad o experiencia en el movimiento o la acción y aunque estrictamente hablando se refiere al uso de las manos, en este caso se extiende su empleo a los pies. Así, los teleoperadores aumentan y amplían las habilidades manipulativas y “pedi-



**Figura 10.1** Un teleoperador aumenta y extiende los sentidos y la destreza del ser humano.

pulativas” del ser humano. Lo anterior excluye a máquinas como los automóviles y aviones controlados por radio.

El prefijo “tele” describe la habilidad de dichos sistemas para proyectar los sentidos y la destreza humanos a través de las barreras impuestas por la distancia, la hostilidad de algún ambiente o la magnitud física de la tarea a realizar. Por ejemplo, en la figura 10.2 se muestra una selección de teleoperadores en los cuales difiere la naturaleza de las barreras encontradas. En la figura 10.2(a) el espacio de control y el área de trabajo pueden conectarse por medio de cables para transporte de corriente, por medio de cables mecánicos o por medio de ondas de radio. Las distancias pueden variar desde unos cuantos metros como en el caso de la manipulación de materiales radiactivos en un laboratorio hasta millones de kilómetros como



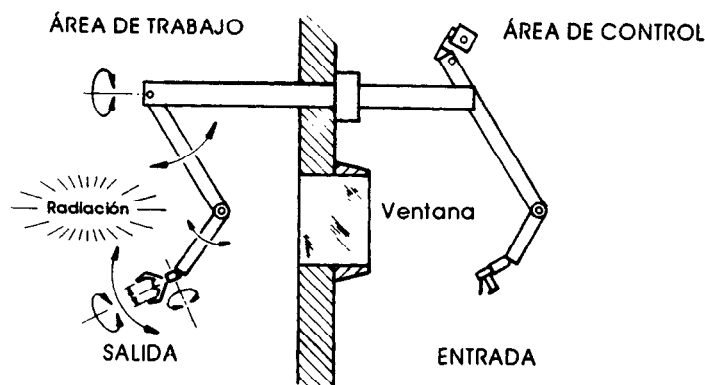
**Figura 10.2** Una selección de teleoperadores: (a) transmisión a través de grandes distancias, (b) amplificadores humanos, (c) prótesis.

en el caso de la obtención de muestras de las superficies de otros planetas. En ambos casos, el ambiente hostil impondría barreras adicionales.

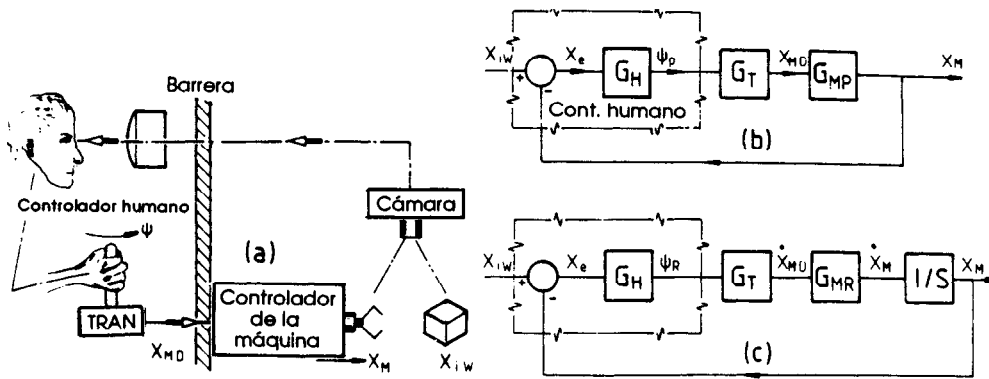
Las distancias entre las áreas de control y de trabajo se reducen a unos cuantos centímetros en el caso de los amplificadores humanos y los dispositivos ortopédicos (figura 10.2(b)) en los que se emplean estructuras exoesqueléticas para aumentar la fuerza de un ser humano normal o para ayudar a una parte debilitada o atrofiada del cuerpo humano a recuperar su fuerza y destreza. En estos casos, las barreras están en esencia relacionadas con la magnitud física de la tarea a realizar. Lo mismo puede decirse de las prótesis (figura 10.2(c)), que pretenden reproducir las funciones de partes faltantes del cuerpo.

### ***Primeras aplicaciones de los teleoperadores***

En la figura 10.3 se muestra un ejemplo de un teleoperador que se usa para manejar isótopos y productos químicos radiactivos para reprocesar y fabricar combustibles nucleares y para inspeccionar equipo radiactivo. Los teleoperadores de este tipo se desarrollaron hace alrededor de 40 años en el *Argonne National Laboratory*, ANL (Laboratorio Nacional de Argonne, de la *U.S. Atomic Energy Commission* (Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos) (Goertz, 1952; 1964). Como se aprecia en la figura, la entrada, o brazo maestro, está acoplado por medios mecánicos o eléctricos a una salida o esclavo idéntico o similar en su forma geométrica. En los primeros modelos este acoplamiento funcionaba en un sólo sentido, de la entrada a la salida; el esclavo sólo tenía la capacidad para seguir al maestro. Estos dispositivos se conocían como teleoperadores u operadores teledirigidos unilaterales. Los avances posteriores en este campo condujeron a los teleoperadores bilaterales en los cuales el acoplamiento era en dos sentidos y la salida podía impulsar a la entrada y viceversa. Esto permitió que las fuerzas de inercia y trabajo generaran una reacción hacia el brazo



**Figura 10.3** Un teleoperador para manejar materiales radiactivos.



**Figura 10.4** Control del efector final: (a) una tarea sencilla con un solo grado de libertad, (b) diagrama de bloques de un controlador de posición, (c) diagrama de bloques de un controlador de velocidad.

maestro, lo cual permitía al operador “sentir” lo que estaba sucediendo en el extremo subordinado. Estos sistemas bilaterales se denominaron algunas veces teleoperadores con reflejo de las fuerzas aplicadas. Su desempeño es superior al del tipo unilateral.

## 10.2 Control de la velocidad contra control de la posición

Al extender la destreza humana, resulta claro que una teleoperación u operación teledirigida requiere algún medio para controlar la posición y la orientación de un efector final. El operador humano juega un papel importante en este sistema de control, que puede ilustrarse considerando una tarea unidimensional (figura 10.4). Al conocer la posición objetivo  $X_{iw}$  para una pieza de trabajo, el trabajo del operador consiste en desarrollar un método para hacer que coincidan la posición del efector final  $X_M$  en el área de trabajo con esta entrada  $X_{iw}$  (figura 10.4(a)). El operador desarrolla una estrategia para corregir errores determinando el error en forma visual y evaluando de manera mental diversas funciones como integrales y derivadas. Esta estrategia conduce a la generación de una señal de control  $\Psi$  que requiere diversas posiciones  $X_{md}$ , velocidades  $\dot{X}_{md}$  y aceleraciones  $\ddot{X}_{md}$  del efector final. La señal  $\Psi$  puede ser una fuerza para oprimir un botón en un controlador digital de encendido-apagado, o para empujar un resorte rígido en forma proporcional. También puede adoptar la forma de desplazamientos directos como en el caso de la rotación de una perilla. Estos transductores ( $G_T$ ), ya sea que se trate de simples botones o perillas o de complicados controladores manuales (véase más adelante), convierten a la señal  $\Psi$  en una forma adecuada de requisito de entrada para el controlador de la máquina ( $G_m$ ).



Los operadores teledirigidos utilizan dos tipos principales de controladores de máquina: *controladores de posición* (figura 10.4(b)) y *controladores de velocidad* (figura 10.4(c)). Cuando se utiliza un control de la posición, la posición de salida del controlador de la máquina  $X_m$  es proporcional a la entrada  $X_{md}$ . Cuando se utiliza un control de la velocidad, el controlador de la máquina produce una velocidad de salida  $\dot{X}_m$  que es proporcional a una velocidad requerida  $\dot{X}_{md}$ . El control de la velocidad impone una mayor carga al controlador humano; en el caso del control de la posición el controlador tiene que generar sólo una señal  $\Psi_p$  que es proporcional a la posición deseada del efector final, mientras que en el control de la velocidad es necesario generar una señal  $\Psi_v$ , cuya integral es proporcional a la posición deseada.

En la figura 10.4 se ilustra un operador teledirigido, que es en particular sencillo, con un sólo grado de libertad, pero es fácil ver cómo este concepto básico puede extenderse a los seis grados de libertad requerido para el control completo de un efector final. Se requiere un controlador independiente para cada grado de libertad. Sin embargo, al ampliar los grados de libertad, la tarea para el controlador humano aumenta en dificultad y es importante que la misma se mantenga dentro de proporciones manejables.

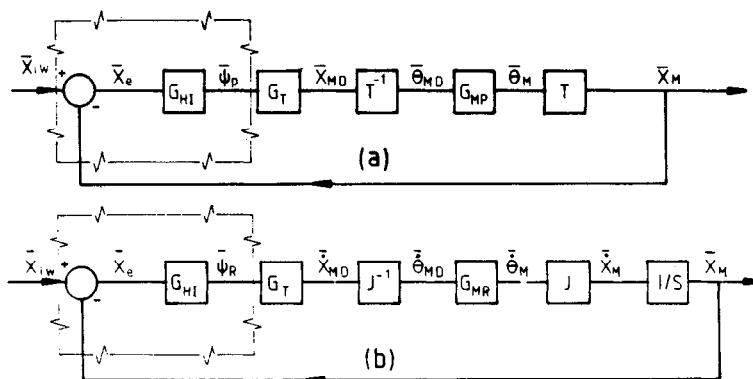
Otra complicación se presenta cuando no existe una relación única entre las coordenadas reales del efector final y las coordenadas de la máquina determinadas por las salidas de los controladores de dicha máquina. Esto sucede, por ejemplo, cuando se emplean brazos articulados. En este caso el operador humano debe igualar un conjunto de entradas en coordenadas reales controlando las coordenadas de la máquina y sus derivadas. Para lograr lo anterior el controlador humano debe transformar en forma mental la posición o velocidad deseadas de las articulaciones en el brazo del manipulador, dependiendo de si se emplea control de posición o de velocidad. La tarea combinada de transformación y control de varias coordenadas máquina puede ser complicada, pero no por ello deja de ser posible. Un brazo de excavadora, por ejemplo, es un sistema con control de velocidad con tres grados de libertad, aunque no requiere una precisión extrema. En aquellos sistemas en los que la precisión es importante, el operador con frecuencia simplificará la tarea manejando cada una de las coordenadas de máquina en forma individual, pero esto puede consumir una gran cantidad de tiempo y con frecuencia será necesario recurrir a una computadora para que sea ésta la que lleve a cabo las transformaciones de coordenadas.

Un operador teledirigido que utiliza controladores de posición y una computadora para las transformaciones de coordenadas se muestra en forma de diagramas de bloque en la figura 10.5(a); en esta figura, una línea horizontal sobre una variable significa que se trata de un vector. Las salidas

generadas por el operador  $\bar{\Psi}_p$  están relacionadas en el espacio con las salidas  $\bar{X}_m$ , es decir, si se requiere un movimiento en la dirección  $x$ , entonces  $\bar{\Psi}_p$  se desplazará en esa dirección. Ahora bien, dado que los controladores de posición  $G_{mp}$  actúan sobre las coordenadas de máquina  $\bar{\Theta}_m$ , es necesario transformar la velocidad  $\bar{X}_{md}$  requerida por el operador en las coordenadas  $\bar{\Theta}_{md}$  requeridas, que se usan entonces como valores de entrada para los controladores de posición. Esta operación se lleva a cabo con una computadora. La transformación inversa  $T^{-1}$  se deriva de las matrices Denavit-Hartenberg descritas en los capítulos 2 y 4. La transformación final de coordenadas de máquina nuevamente a coordenadas reales se realiza con el brazo articulado. El lector reconocerá esto como una forma de control geométrico.

El sistema de la figura 10.5(a) libera al operador de la tarea de transformar las coordenadas pero le deja la tarea de controlar hasta seis grados de libertad. Esta es una tarea viable, aunque en muchos casos el operador deberá primero ubicar al efector final usando los tres grados de libertad de traslación antes de utilizar los grados de libertad rotacionales para la orientación.

Las transformaciones de coordenadas también pueden manejarse por la computadora cuando se utilizan controles de velocidad (figura 10.5(b)). En este caso debe calcularse la inversa  $J^{-1}$  del Jacobiano. Este método de control se conoce como control resuelto de la velocidad de movimiento (RMRC). Los controladores de velocidad impulsan al efector final con una velocidad proporcional a, y en la dirección de, la señal aplicada al transductor de entrada. El control resuelto de la velocidad de movimiento requiere una menor cantidad de computación que el sistema para control de la posición de la figura 10.5(a), dado que el cálculo de  $J^{-1}$  es más sencillo



**Figura 10.5** Operación teledirigida auxiliada por medio de una computadora:  
(a) diagrama de bloques de un sistema que utiliza un controlador de posición, (b) diagrama de bloques de un sistema que utiliza un controlador de velocidad.

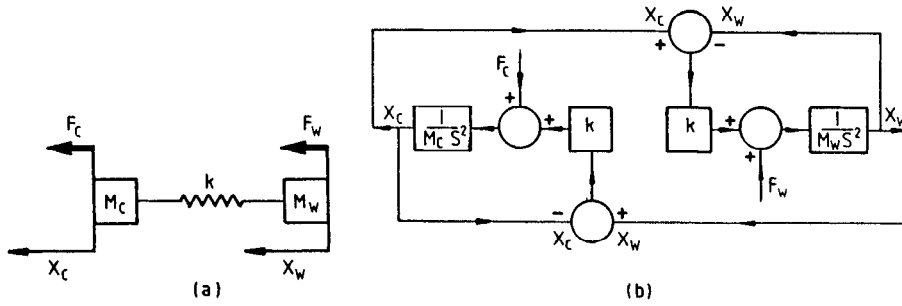
que el de  $T^{-1}$ . Sin embargo, en términos de precisión y tiempo para completar una tarea, todavía presenta la desventaja de requerir que el operador genere un vector de señal  $\bar{\Psi}_r$ , cuya integral es el vector de la posición deseada  $\bar{X}_m$ .

### 10.3 Control unilateral y bilateral

Los sistemas antes descritos tratan de lograr que la posición de un efector final coincida con la de una pieza de trabajo u otro objetivo y dependen de una retroalimentación visual para determinar si se ha cumplido con dicho objetivo. Los movimientos requeridos al momento de realizarse la entrada al controlador de la máquina producen movimientos relacionados a la salida. El acoplamiento entre la entrada y la salida del controlador, ya sea mecánico, eléctrico o hidráulico, es en un sólo sentido; se hace que la salida siga a la entrada. Estos sistemas se denominan teleoperadores *unilaterales*.

Cuando se requiere un alto nivel de destreza operacional, como en una operación de ensamblaje, de mantenimiento o de manipulación de objetos en el espacio, se ha descubierto que el control unilateral resulta insuficiente. Por ejemplo, un operador puede llevar con facilidad a un sistema unilateral más allá de sus límites de rendimiento. Si fuera necesario que el operador requiriera que el efector final se moviera más rápidamente que lo que permiten sus accionadores, la falta de sincronización resultante entre las entradas de control y los movimientos del manipulador, podría resultar confusa, e incluso llegar a provocar una colisión. Como la retroalimentación es visual, el operador no cuenta con información directa sobre las fuerzas de salida, ya sea debidas a la inercia o a una reacción; esto puede hacer que se generen requerimientos excesivos para los accionadores o, de hecho, que se apliquen fuerzas excesivas a la pieza de trabajo. Esto puede evitarse mediante el empleo de teleoperadores *bilaterales* o reflejantes de la fuerza aplicada.

En un operador teledirigido bilateral existe un doble acoplamiento entre la entrada y salida del controlador: la inercia y las fuerza de trabajo ejercidas sobre la salida pueden *retroaccionar* la entrada. Así, en adición al ciclo de ubicación hacia adelante que hace al efector final seguir los requerimientos de la entrada, existe un ciclo inverso desde el efector final hacia el dispositivo de entrada. El servoparámetro que se usa para el ciclo de retroceso puede ser la posición o la fuerza pero, en el primer caso, el operador detecta todas las fuerzas encontradas durante la manipulación. Una combinación de retroalimentaciones visuales y de fuerza brindan una mejor perspectiva de lo que en realidad sucede y esto permite mejorar la precisión y reducir el tiempo requerido para finalizar una tarea.



**Figura 10.6** Un ejemplo sencillo de un sistema bilateral de error común:  
(a) un modelo de una barra, (b) diagrama de bloques en el que se ilustran dos  
sistemas acoplados impulsados por un error común.

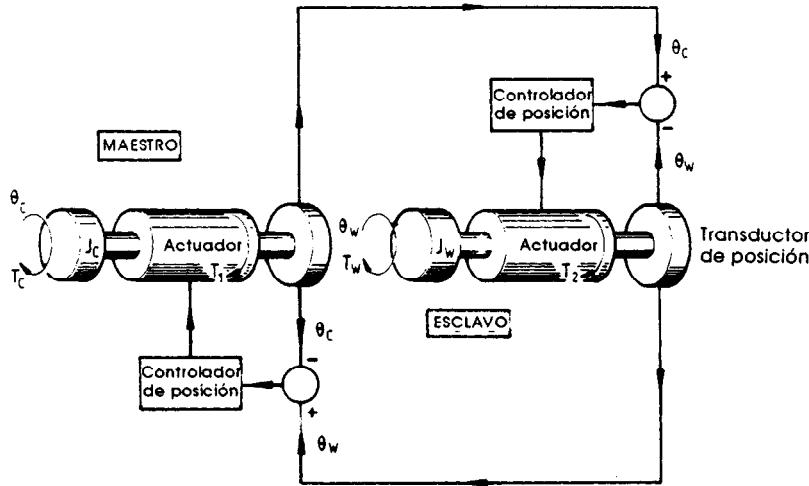
### Sistemas bilaterales de error común

Considérense en primer lugar aquellos operadores teledirigidos en los cuales tanto el ciclo de avance como el de retroceso utilizan información sobre la posición. El punto de partida será el más elemental de los operadores teledirigidos: una varilla de largo alcance para picar substancias peligrosas. Aun cuando es un ejemplo muy sencillo, se trata en realidad de un sistema bilateral y representa la base para el funcionamiento del teleoperador mecánico de la figura 10.3. Cualquiera de los extremos puede impulsar al otro y las fuerzas en cualquiera de los extremos se reflejan en el otro. Este punto puede ilustrarse al modelar una barra flexible como dos masas  $M_c$  y  $M_w$  conectadas por medio de un resorte con una rigidez  $k$  (figura 10.6). Las fuerzas externas  $F_c$  y  $F_w$  se aplican a la barra en el espacio de control y el área de trabajo. Las ecuaciones de movimiento son:

$$M_c \ddot{x}_c = F_c + k(x_w - x_c) \quad (10.1)$$

$$M_w \ddot{x}_w = F_w + k(x_c - x_w) \quad (10.2)$$

En la figura 10.6(b), que utiliza un operador de Laplace  $s$ , se muestran estas ecuaciones acopladas en la forma de un diagrama de bloques. Pueden identificarse dos ciclos de retroalimentación. El ciclo del lado derecho, o ciclo de avance, derivado del error  $(x_w - x_c)$  trata de hacer a  $x_w$  igual a  $x_c$ . Al ciclo del lado izquierdo, o ciclo de retroceso, lo impulsa el error  $(x_w - x_c)$  y trata de hacer a  $x_c$  igual a  $x_w$ . Por lo tanto, el resorte, que en este caso es el controlador, trata de lograr que el desplazamiento de cada extremo sea igual al del otro. Esto destaca la reversibilidad, o naturaleza bilateral, de este sencillo sistema: cualquiera de los extremos puede impul-



**Figura 10.7** Un teleoperador electromecánico bidireccional.

sar al otro. Si se suman las ecuaciones (10.1) y (10.2) se obtiene la relación entre las fuerzas externas:

$$F_c = M_c \ddot{x}_c + M_w \ddot{x}_w - F_w \quad (10.3)$$

Esto sirve para confirmar la naturaleza de reflexión de fuerzas del sistema. La fuerza del operador  $F_c$  debe vencer las fuerzas de inercia además de la fuerza en el extremo de salida.

Los sistemas mecánicos como los descritos en la figura 10.3 son fáciles de entender pero difíciles de construir (Goertz, 1964). El ANL Modelo 1 concebido en la década de los años cuarenta, continuó mejorándose varios años hasta convertirse en el Modelo 8 el cual llegó a ser el caballo de batalla de la industria nuclear. A este dispositivo lo impulsaba una maraña de cintas y poleas y contaba con seis grados de libertad, además de un control para cerrar la mano. Pero los operadores teledirigidos mecánicos tienen muchos problemas que restringen su aplicación. El juego en los engranes, el juego en los rodamientos y la elongación de los cables se combinan para reducir la precisión de la ubicación; la fricción y la inercia del brazo de control pueden reducir la retroalimentación de la fuerza a un nivel carente de sentido. Además de lo anterior, estos dispositivos no pueden usarse en donde las distancias entre las áreas de trabajo y de control son muy grandes, como por ejemplo en el espacio, o en donde no pueden tolerarse fugas alrededor de una barrera, como en las aplicaciones submarinas a grandes profundidades.

La transmisión eléctrica de información y potencia puede superar la mayoría de estos problemas, por lo que nos concentraremos en analizar el

sistema electromecánico bilateral de la figura 10.7. En este caso, el principio sigue siendo el mismo: cada accionador (en lugar del resorte de la figura 10.6) trata de igualar la rotación en su extremo del sistema con la rotación del otro extremo. Con el fin de lograrlo, una señal proporcional a la rotación  $\theta_c$  se alimenta hacia el espacio de trabajo, y  $\theta_w$  se retroalimenta al espacio de control.  $T_c$  es el par aplicado por el operador humano y  $T_w$  es el par externo causado por la gravedad o la reacción.

Pueden identificarse dos ciclos de control de la posición, similares a los de la figura 10.6. Si se descartan los términos de disipación negativa de la energía, las ecuaciones en el lado de control son

$$T_c + T_1 = J_c \ddot{\theta}_c \quad (10.4)$$

en donde  $J_c$  es la inercia del actuador y el transductor de entrada.  $T_1$ , la fuerza de rotación generada por el actuador, se puede expresar como

$$T_1 = K_c (\theta_w - \theta_c) \quad (10.5)$$

en donde se supone un controlador proporcional simple con una ganancia  $K_c$ .

Por lo tanto, si se combinan las ecuaciones (10.4) y (10.5) se obtiene

$$J_c \ddot{\theta}_c = T_c + K_c (\theta_w - \theta_c) \quad (10.6)$$

La similitud entre esta ecuación y la ecuación (10.1) es obvia. Si se centra ahora la atención en el área de trabajo, es posible escribir

$$T_w + T_2 = J_w \ddot{\theta}_w \quad (10.7)$$

y

$$T_2 = K_w (\theta_c - \theta_w) \quad (10.8)$$

por lo tanto,

$$J_w \ddot{\theta}_w = T_w + K_w (\theta_c - \theta_w) \quad (10.9)$$

que es similar a la ecuación (10.2).

Es importante que el desplazamiento  $\theta_w$  del efector final siga al desplazamiento del transductor de entrada  $\theta_c$ . Si se utiliza el operador de Laplace, la ecuación (10.9) puede reescribirse como

$$\theta_w = \frac{K_w}{J_w s^2 + K_w} \theta_c + \frac{1}{J_w s^2 + K_w} T_w \quad (10.10)$$

Esto indica la presencia de un transitorio no amortiguado, lo cual no es sorprendente dado que los términos de disipación de energía se han ignorado. Si dichos términos estuvieran presentes, el transitorio desaparecería en forma gradual hasta alcanzar un estado estable que se expresa como

$$\theta_{ws} = \theta_{cs} + T_{ws}/K_w \quad (10.11)$$

Esto muestra un error inducido por el par, que se puede reducir si se aumenta la ganancia del controlador.

Otra relación importante es la que se da entre el par  $T_c$  aplicado por el operador y el par  $T_w$  que actúa sobre el efector final. Si se multiplica la ecuación (10.6) por  $K_w$  y la ecuación (10.9) por  $K_c$  y se suman, se obtiene

$$T_c = J_c \ddot{\theta}_c + (K_c/K_w)(J_w \ddot{\theta}_w - T_w) \quad (10.12)$$

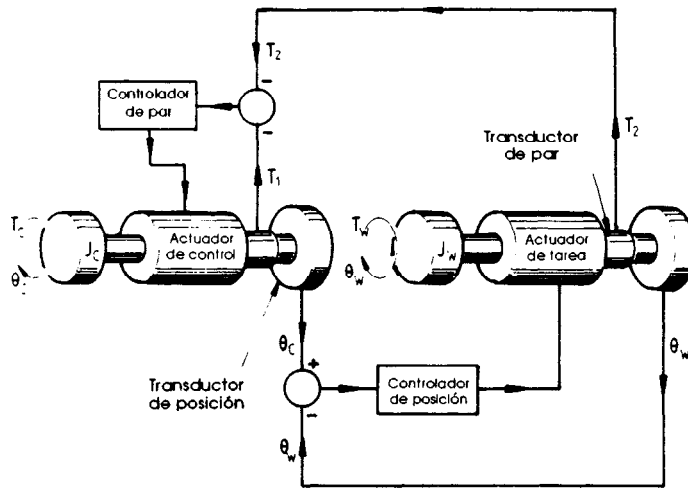
que es similar a la ecuación (10.3). De esta forma, el operador percibe el par de inercia en el extremo de control, una proporción del par de inercia en el extremo de trabajo y una proporción del par aplicado en forma externa en el extremo de trabajo. En estado estable,  $T_{cs} = -(K_c/K_w)T_{ws}$ . Esto es lo que se esperaría: si un par externo trata de aumentar el desplazamiento del efector final, entonces el operador tendrá que compensar dicho par en el extremo de control. Si  $K_c = K_w$ , el operador percibe un par idéntico.

El sistema es reversible: puede *retroimpulsarse*. Las expresiones para  $\theta_c$  y  $T_w$  pueden determinarse si se cambian los sufijos en las ecuaciones (10.10) y (10.12). Dado que ambos controladores utilizan el error entre  $\theta_w$  y  $\theta_c$  esta forma particular de operador teledirigido se denomina en ocasiones como sistema de *error común*.

Los primeros sistemas de error común los construyó el grupo de Goertz en ANL a principios de los cincuenta (Goertz y colaboradores, 1953; Arzebaeher, 1960; Burnett, 1957). Por ejemplo, el Manipulador ANL Modelo 2 utilizaba motores de CA reversibles para el accionamiento. El principio de error común se instrumentó utilizando la misma corriente para activar ambos motores, con un sencillo circuito asegurando que esta corriente fuera proporcional al error de posición. Los transitorios se amortiguaron mediante el empleo de señales de intensidad generadas por medio de tacogeneradores.

### ***Sistemas bilaterales con retroalimentación de fuerzas***

Se mencionó anteriormente que algunos operadores teledirigidos bilaterales utilizan información sobre la fuerza en lugar de información sobre la posición para el ciclo de retroceso. En la figura 10.8 se muestra un sistema como el descrito en la forma de diagramas de bloque. Los transductores de



**Figura 10.8** Un teleoperador bilateral con retroalimentación de fuerza.

par miden los pares generados por los actuadores de control y de trabajo,  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente. Al igual que antes, el ciclo de control de posición hacia adelante intenta hacer que  $\theta_w$  sea igual a  $\theta_c$ . El ciclo de control del par de retroceso tiene la función de asegurar que el actuador de control genere un par  $T_1$  que sea el negativo de, la reacción de, o la reflexión del par  $T_2$  generado por el actuador de trabajo. Por lo tanto, la entrada al ciclo de par es  $-T_2$ . Este es un intento de reproducir las fuerzas internas iguales y opuestas en el resorte del sistema mecánico de la figura 10.5.

El ciclo de posición de avance es igual que el del sistema de error común de la figura 10.7, por lo que la ecuación (10.10) puede usarse de nuevo para relacionar  $\theta_w$  y  $\theta_c$ . Las ecuaciones de los pares son, igual que antes,

$$T_c + T_1 = J_c \ddot{\theta}_c \quad (10.4)$$

$$T_w + T_2 = J_w \ddot{\theta}_w \quad (10.7)$$

y, si se supone un controlador sencillo de pares proporcionales con una ganancia  $K_t$

$$T_1 = K_t(-T_2 - T_1) \quad (10.13)$$

o

$$T_1 = K_t T_2 / (1 + K_t) \quad (10.14)$$

Al substituir en lugar de  $T_1$  y  $T_2$  las ecuaciones (10.4) y (10.7) se obtiene



$$T_c = J_c \ddot{\theta}_c + \{K_t/(1 + K_t)\}(J_w \ddot{\theta}_w - T_w) \quad (10.15)$$

Este resultado deberá compararse con la ecuaciones (10.13) y (10.12). En el estado estable

$$T_{cs} = -\{K_t/(1 + K_t)\}T_{ws} \quad (10.16)$$

De esta forma el sistema, al igual que el teleoperador bilateral de error común, permite al operador sentir las fuerzas y pares presentes en el efector final.

Algunos de los primeros sistemas bilaterales con retroalimentación de fuerzas fueron diseñados por Mosher (1967) y Mosher y Wendel (1960). Estos sistemas mostraban cómo la malla de fuerza de retroceso podía instrumentarse en un teleoperador electrohidráulico. La diferencia de presión a través del pistón del actuador hidráulico de salida se medía con un transductor y la señal eléctrica resultante, que era una medida de la fuerza de salida, se retroalimentaba a una servoválvula controlada por presión que impulsaba el actuador de control. Como este tipo de servoválvula proporciona una presión de salida proporcional a la corriente aplicada, entonces la fuerza de reacción en el actuador de control era a su vez proporcional a la fuerza suministrada por el actuador de trabajo.

#### 10.4 Dificultades analíticas

La sección anterior ha dejado claro que incluso el más sencillo teleoperador con un solo grado de libertad presenta una tarea analítica bastante compleja. Resulta imposible producir un modelo matemático razonablemente preciso de un operador teledirigido con seis grados de libertad. En el capítulo 4 se ilustran algunas de las dificultades que surgen en la creación de modelos para las fuerzas dinámicas de brazos de robots, pero aquí los problemas están agravados por la presencia del operador humano, quien tiene características no lineales que varían con el tiempo.

Incluso para las más sencillas tareas de control, han sido muchos los esfuerzos dedicados a encontrar un modelo matemático adecuado para el operador humano (Kelley, 1968). En una operación de seguimiento, por ejemplo, donde el operador utiliza un lápiz de control para hacer que un punto en una pantalla siga la posición de un punto móvil de entrada, se ha demostrado que el operador humano puede aproximarse con la función de transferencia

$$\frac{K(1 + T_2 s) \exp(-T_1 s)}{(1 + T_3 s)(1 + T_4 s)} \quad (10.17)$$

en donde  $K$  es la ganancia, ajustada por el operador humano al aproximarse a una estabilidad marginal;  $T_1$  es la demora en el tiempo de reacción, que varía de 0.2 a 0.5 segundos para estímulos aleatorios;  $T_3$  es el retraso neuromuscular para el brazo humano, normalmente entre 0.1 y 0.16 segundos;  $T_4$  es la constante del tiempo de retraso cuyos valores observados se encuentran entre 1 y 20 segundos en un seguimiento manual, aunque la constante puede tener cualquier valor, dependiendo del sistema;  $T_2$  es la constante del tiempo de adelanto de reacción, que se relaciona con la habilidad de un operador para anticipar los movimientos de la entrada. Se ha demostrado que la relación  $T_2/T_4$  en la respuesta del operador se adaptará al óptimo para un sistema en particular. Por ejemplo, en el seguimiento de la posición, con una función de transferencia de elementos de control  $k$ , la relación es elevada, mientras que en el seguimiento de una aceleración, con una función de transferencia de elementos de control  $k/s^2$ , la relación es baja.

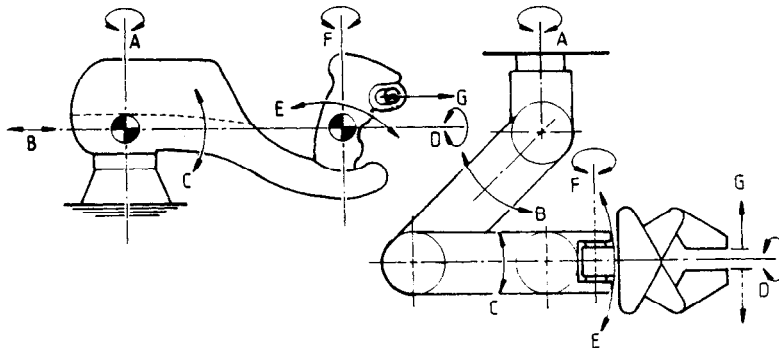
De lo anterior resulta evidente que cualquier intento de analizar un teleoperador con seis grados de libertad no pasará de ser una aproximación, que dé en el mejor de los casos una idea del sistema y que ayude al diseñador a percibir las interrelaciones entre los parámetros de control. Estas dificultades han conducido a una gran dependencia en el uso de simuladores para el diseño de teleoperadores y otros sistemas similares que dependen de controladores humanos.

### 10.5 Dispositivos de entrada para control

El *dispositivo de entrada para control* (CID) suministra una interfase de actuación entre el operador humano y el controlador de la máquina. Convierte la señal generada por el operador (figura 10.4) en una señal que la máquina puede entender: es en sí un *transductor*.

#### *Interruptores de encendido-apagado*

El dispositivo de entrada para control más simple es el *interruptor de encendido-apagado* que se usa para controlar el suministro de corriente a un actuador. Estos interruptores son comunes en los sistemas para control de velocidad, en donde la operación del interruptor hace que el actuador se mueva con una velocidad fija. Para un control completo de un teleoperador es común montar estos interruptores en una caja de control y distribuirlos de tal forma que reflejen la configuración del manipulador. Con frecuencia se incorpora un grado de antropomorfismo, utilizando interruptores de tres posiciones de manera que una articulación pueda girar hacia la derecha al empujar el interruptor hacia la derecha, hacia la izquierda al empujar el interruptor hacia la izquierda y detenerse al colocar el interruptor en la posición central. Estas cajas de control son similares en algunos

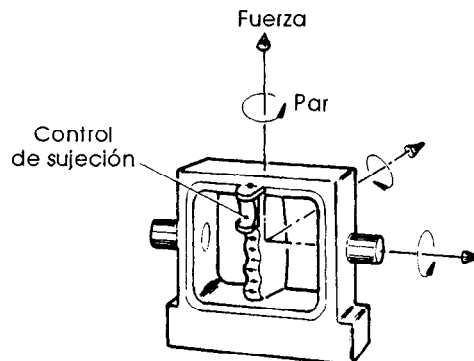


**Figura 10.9** Una palanca de mando puede controlar los seis grados de libertad de un manipulador y operar el efector final.

aspectos a las antes descritas para la programación de un robot. A pesar de su sencillez, su tamaño compacto y su costo bajo, estas cajas tienen varias limitaciones importantes: sólo es posible mover un accionador a la vez durante manipulaciones de precisión; no existe retroalimentación sobre la fuerza aplicada, lo cual restringe su empleo a operadores teledirigidos unilaterales; el control de la velocidad requiere potenciómetros o interruptores con polos múltiples; la identificación del operador con la tarea es mínima.

### **Palancas de mando**

La palanca de mando es otro dispositivo de entrada para control comúnmente usado. Consiste en una palanca móvil con hasta seis grados de libertad. La instalación de botones de control e interruptores en la palanca de mando al alcance de los dedos del operador es una práctica muy usual. En la figura 10.9(a) se muestra cómo se puede utilizar una palanca de mando para controlar los seis grados de libertad de un manipulador y para



**Figura 10.10** Un controlador manual isométrico con seis grados de libertad.

operar la acción de aprisionamiento del efector final (Johnsen y Corliss, 1969). Las señales de los transductores instalados en los distintos ejes de la palanca de mando se usan para controlar los actuadores en los ejes correspondientes del manipulador. Los transductores pueden ser potenciómetros si se utiliza una palanca operada por posición (isotónica), o galgas tensométricas si se usara una palanca operada por fuerza (isométrica). En cualquier caso, es posible controlar el manipulador en forma proporcional en vez de con base en el encendido-apagado asociado con las cajas de interruptores. Las palancas de control se utilizan por lo general en los sistemas para control de velocidad, en donde las señales de los transductores de la palanca se usan para controlar las velocidades de los accionadores. Los operadores consideran que la palanca de mando es superior a la caja de interruptores, debido principalmente a que existe una correspondencia más obvia entre las entradas alimentadas por el operador y los movimientos del manipulador.

Se han diseñado muchos tipos nuevos de controladores manuales con varios grados de libertad. Uno de ellos, creado para utilizarse en el control de velocidad de movimientos resueltos (RMRC), se muestra en la figura 10.10. Se trata de un controlador manual isométrico con seis grados de libertad (Nevins y Whitney, 1977). A las velocidades del efector final, de translación y de rotación con respecto a tres ejes las determinan las fuerzas y los pares aplicados sobre los ejes del controlador manual. También se incluye un gatillo para abrir y cerrar las tenazas. Una de las principales ventajas de este tipo de controladores isométricos radica en su diseño compacto, con movimientos casi imperceptibles en el controlador que permiten movimientos potencialmente ilimitados en el efector final.

### *Control de réplica*

Otra forma de maniobrar el efector final hasta una posición deseada consiste en el uso de una réplica del manipulador. La idea es simple. Si cada articulación de la réplica estuviera equipada con un transductor de posición que suministrara una señal de entrada a los servos correspondientes de las articulaciones en el brazo real, entonces la orientación manual de la réplica resultaría en una orientación similar del brazo real. Este tipo de réplica se ilustró en el sistema mecánico de la figura 10.3, donde los cables aseguraban que se tuvieran rotaciones iguales en articulaciones correspondientes. Este sistema mecánico demuestra tanto una similitud geométrica como una identidad geométrica para las entradas y las salidas, pero esto no es siempre necesario y en muchos casos es deseable generar una salida a una escala superior o inferior con respecto a la entrada. Por ejemplo, los manipuladores remotos que se usan en microcirugía y en el ensamblaje de piezas pequeñas requieren una reducción en la escala,

mientras que los operadores teledirigidos para el manejo de grandes estructuras espaciales requieren una magnificación de la escala.

Se ha aprobado que a pesar de su costo y complejidad, el control de réplica, al que en ocasiones se denomina *control de terminal*, es muy atractivo. Hasta cierto punto es como usar una palanca de mando con articulaciones múltiples, pero el operador tiene que concentrarse sólo en un movimiento: el de la mano de la réplica. Al moverla en el conjunto de coordenadas reales del operador, los transductores de posición y los servos de las articulaciones aseguran que la mano real se mueva una distancia proporcional en sus coordenadas reales. Otra ventaja es la facilidad para incorporar una retroalimentación de la fuerza, lo que permite explotar todo el potencial del sistema bilateral.

Es posible lograr un mayor grado de antropomorfismo si el operador "se viste con" la réplica. El operador teledirigido electrohidráulico bilateral Handyman fue construido en la década de los años cincuenta, por *General Electric* como parte del programa *Aircraft Nuclear Propulsion* (Propulsión Nuclear de Aeronaves (Mosher, 1967)). El Handyman contaba con dos brazos y diez articulaciones controladas en cada combinación de brazo y mano. El controlador humano se colocaba en el interior o se instalaban los controles maestros, de manera que cada movimiento del brazo y de la mano fuera replicado en el extremo de trabajo del operador teledirigido.

Un grado máximo de antropomorfismo se aprecia en los llamados amplificadores humanos (figura 10.2(b)), en los cuales el operador viste tanto el maestro como el esclavo; estas estructuras exoesqueléticas se han de examinar en mayor detalle más adelante en este capítulo.

### ***Instrucciones orales (Entradas por voz)***

Todos los dispositivos de entrada para control anteriores requieren que el operador mueva sus miembros o aplique fuerzas por medio de ellos. Las instrucciones orales permiten una forma más directa de control, lo cual ofrece las múltiples ventajas de la comunicación por medio de un lenguaje natural. Una característica en particular atractiva es la posibilidad de lograr la separación y motilidad física del operador y la máquina; una desventaja importante es la pérdida de la retroalimentación cinestésica asociada con la retroalimentación bilateral.

Los sistemas de reconocimiento automático de la voz (ASR) se utilizan en la actualidad para tener acceso en forma oral a archivos de datos y a áreas de extrema seguridad; pueden ayudar a los minusválidos; pueden usarse como auxiliares en la enseñanza y como juguetes. El objetivo final consiste en crear un sistema automático de reconocimiento de voz que pueda reconocer una secuencia oral completa articulada por cualquier persona, pero esto está todavía muy lejano y, en la actualidad, los sistemas

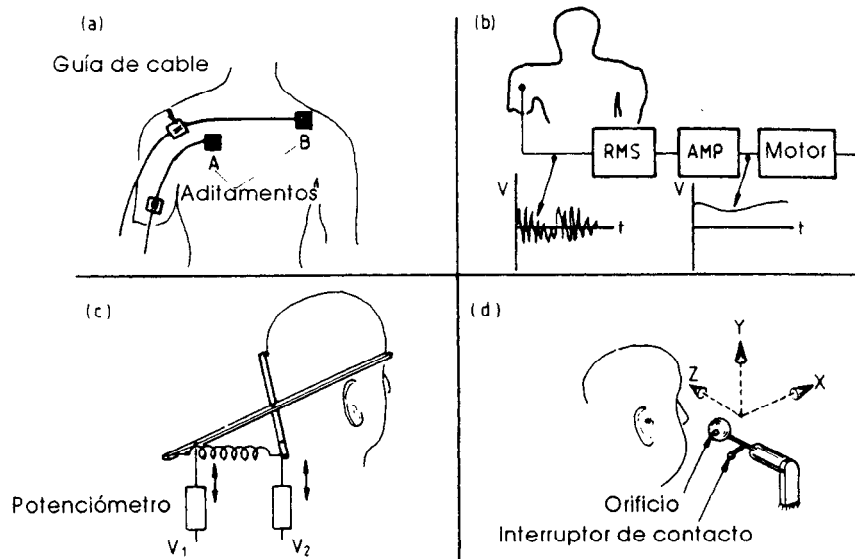
más comunes son aquellos que manejan palabras aisladas producidas por un hablante conocido (sistemas *dependientes del hablante*). Básicamente, estos sistemas incluyen una serie de etapas de procesamiento de datos que convierten señales acústicas analógicas a señales eléctricas digitales, extraen características mensurables de estas señales y comparan esta información extraída con modelos almacenados.

Los sistemas para reconocimiento de palabras aisladas (IWR) requieren que cada palabra se separe de otra un con breve silencio (Baker, 1981). Los sistemas dependientes del hablante requieren un cierto periodo de capacitación durante el cual el operador repite una palabra varias veces con el fin de permitir que se establezca una "plantilla" representativa en la memoria de la computadora. La entrada acústica se digitaliza primero mediante un muestreo entre 6 kHz y 20 kHz, dependiendo de la calidad deseada; cada muestra se cuantifica por lo general con 12 bit. La construcción de la plantilla comienza por encontrar el inicio y fin de cada palabra. La palabra se divide entonces entre aproximadamente 12 y 16 intervalos de tiempo o cuadros y cada una de ellas se describe o caracteriza con hasta 32 parámetros acústicos, incluyendo características espectrales. Estos procedimientos se repiten en la fase de reconocimiento; la palabra desconocida se divide en cuadros y se determinan las características de los cuadros. A continuación se realiza una comparación entre este conjunto de características y las de la plantilla almacenada en la memoria; la computadora calcula una calificación para cada comparación. De entre estas calificaciones la computadora supone que la mejor es la que identifica la palabra alimentada.

Debido a las limitaciones en cuanto al tamaño de la memoria, la mayoría de los sistemas para reconocimiento de palabras aisladas comerciales limitan el número de plantillas a aproximadamente 60 palabras con una duración de hasta 2s. Esto es más que suficiente para accionar un teleoperador, dado que es posible lograr un control razonable de cualquier grado de libertad utilizando sólo cinco órdenes, como *rápido izquierda*, *lento izquierda*, *rápido derecha*, *lento derecha* y *alto*. Sword y Park (1977) describen el uso de un sistema como éste para la descarga de las bombas de un cohete.

### 10.6 Dispositivos para control de entrada para minusválidos

El anterior estudio sobre los dispositivos para control de entrada se concentró primordialmente en sus aplicaciones industriales y militares pero, en realidad, los teleoperadores cubren un campo mucho más extenso, en el que se incluyen dispositivos ortopédicos y prótesis para mejorar y ampliar las capacidades limitadas de ciertas personas. La gran variedad de posibles incapacidades físicas ha requerido la invención de muchos dispositivos



**Figura 10.11** Dispositivos para control de entrada para personas minusválidas: (a) cables Bowden, (b) señales electromiográficas, (c) movimientos de la cabeza, (d) operación con la boca.

para control de entrada especializados distintos. En la figura 10.11 se ilustran algunas posibilidades.

En la figura 10.11(a) se muestra cómo se puede emplear la flexión de los brazos o el desplazamiento de los hombros para accionar una prótesis de brazo por medio de un cable Bowden. Las prótesis impulsadas por reacciones del cuerpo son ligeras y resistentes y, dado que son mecanismos muy sencillos, son relativamente poco costosas (Childress, 1973; Fletcher y Leonard, 1955). Además, proporcionan al operador con un elemento de retroalimentación de fuerza y, en un menor grado, con una retroalimentación propioceptiva. Sin embargo, estos brazos están por lo general restringidos a uno o dos grados de libertad ya que sólo existe un número reducido de puntos adecuados para su acoplamiento. Su uso puede ser cansado, dado que con frecuencia su operación requiere movimientos corporales exagerados.

Las prótesis impulsadas por movimientos corporales son adecuadas para amputaciones a bajo nivel, pero con amputaciones a un nivel más alto, como en la desarticulación del hombro, el número de lugares de control disponibles y la magnitud de la potencia que debe ser generada, pueden ser insuficientes para este tipo de dispositivos. En estos casos resulta necesario recurrir al uso de prótesis impulsadas en forma externa. Los movimientos corporales, como los ilustrados en la figura 10.11(a), las masas musculares, o los vestigios de miembros en el caso de quienes sufren deformaciones

congénitas, pueden usarse para accionar interruptores que impulsen a los actuadores. Pero otra forma de derivar las entradas para lograr un control es mediante el uso de los pequeños potenciales eléctricos generados por la actividad muscular. Estas señales electromiográficas (e.m.g.), generalmente en micro o milivolt, pueden detectarse con electrodos de aguja que registran señales de las fibras musculares individuales, o más usualmente (y mucho menos doloroso) con electrodos en forma de discos metálicos colocados sobre la piel para registrar una sumatoria de la actividad en varias fibras musculares. Por lo general, se utilizan electrodos de plata y cloruro de plata para este fin. La señal e.m.g. registrada en la superficie debe procesarse con el fin de extraer información útil. Como se muestra en la figura 10.11(b) la señal aparenta ser aleatoria y con gran contenido de ruido, pero se ha demostrado que la fuerza global generada por el músculo es proporcional a la raíz cuadrada media de la señal, o al promedio de la integral de la señal rectificada (Patla y colaboradores, 1982). De esta forma, las variaciones en la tensión de un músculo provocan diversos potenciales que se pueden usar para controlar actuadores impulsados desde el exterior.

En casos de incapacidad extrema, como los cuadraplégicos que no tienen control sobre brazos y piernas, es necesario buscar otras fuentes de movimiento corporal para fines de control. Afortunadamente muchos cuadraplégicos todavía conservan un buen control de los movimientos de la cabeza cuando el tronco se estabiliza en forma adecuada. En la figura 10.11(c) se muestra un transductor que puede medir los movimientos de la cabeza en los planos sagital y frontal, es decir, rotaciones hacia adelante y hacia atrás y hacia la izquierda y la derecha (Guitte y colaboradores, 1979). El enlace con la cabeza se realiza por medio de un elemento en forma de V con carga de resorte, que mantiene la cosmética de la apariencia frontal del sujeto. Los movimientos de la cabeza también se usan en ocasiones para aumentar el control sobre el teleoperador por parte de personas sin limitaciones físicas, en particular para dirigir las cámaras de televisión hacia los objetivos (Charles y Vertut, 1977).

Otra forma de dispositivo para control de entrada operado con la cabeza se ilustra en la figura 10.11(d). La palanca de mando, mostrada a la derecha del diagrama, está montada sobre soportes rígidos a un lado de la cabeza del operador y se acciona por medio de la boca (Schmalenbach y colaboradores, 1978). El eje descansa sobre la parte frontal de la cara, como si se tratara de una flauta, de manera que no se obstruya la visión. La palanca de mando puede moverse en las tres direcciones espaciales para producir tres señales analógicas con polaridad positiva y negativa. Se pueden obtener también señales discretas de contactos digitales operados con la lengua, o al soplar o aspirar sobre el pequeño orificio ubicado en el posicionador bucal. Los movimientos de los ojos, las entradas de voz y las señales electromiográficas también suministran útiles señales discretas.



## 10.7 Aplicaciones de los teleoperadores

En esta sección se estudiarán exclusivamente tres áreas principales de aplicación: espaciales, oceanográficas y máquinas cibernéticas antropomórficas.

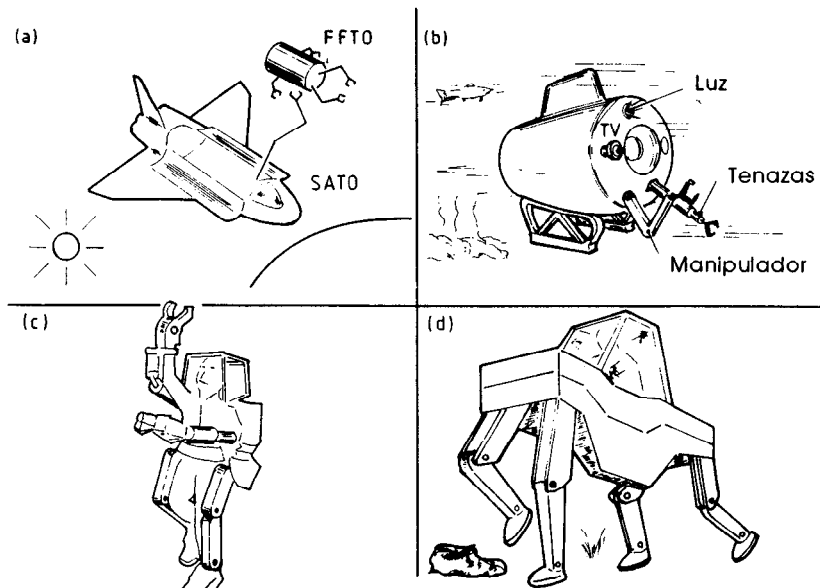
### *Aplicaciones espaciales*

Los vacilantes primeros pasos hacia el uso de teleoperadores en el espacio se dieron hace cerca de veinte años cuando la NASA logró posar el *Surveyor* sobre la superficie lunar. Como parte de este proyecto se transmitieron imágenes televisadas a la Tierra y se llevaron a cabo muestreos de la superficie lunar a control remoto. El brazo para la recolección de las muestras tenía solamente tres grados de libertad: rotación sobre el azimut, rotación en elevación y extensión en una dirección radial. El operador podía accionar un motor por vez a través de comandos digitales generados en la *Goldstone Deep Space Network Station* (Estación Goldstone de Redes del Espacio Exterior) de la NASA ubicada en California. En fechas más recientes el Viking 2 llevó a cabo operaciones similares en Marte. La atención también se ha concentrado en el uso de teleoperadores móviles en las superficies de los distintos planetas. Estos operadores pueden recolectar y manejar muestras, así como llevar a cabo experimentos; además, se pueden usar para la reparación y el mantenimiento de equipo instalado en el planeta.

Las exploraciones de las superficies lunar y marciana hicieron evidente las grandes dificultades asociadas con el control de teleoperadores a través de distancias extremadamente grandes. Incluso con ondas de radio que se desplazan a  $3 \times 10^8$  m/s el retraso entre la iniciación de una acción en la Tierra y la percepción de sus efectos a estas grandes distancias, es apreciable: 2.6 s para la Luna y de 6 a 44 minutos para Marte, dependiendo de si se encuentra en su conjunción inferior o superior con la Tierra. Estas demoras redundan en considerables problemas de control; una posible solución sería controlar los operadores teledirigidos desde satélites en una órbita en el espacio exterior.

Otra aplicación espacial se ilustra en la figura 10.12(a) en la que se muestra un transbordador espacial (Orbitador) que utiliza un teleoperador acoplado al transbordador (SATO) para recuperar un teleoperador en vuelo libre (FFTO). Estos sistemas se están desarrollando para la colocación, la captura, el mantenimiento y la reparación de satélites, para la corrección de las órbitas de los mismos, para la destrucción de satélites militares, para la construcción de estaciones espaciales y varios otros fines. (Onega y Clingman, 1972; Nathan y Flatau, 1978; Taylor, 1978).

El teleoperador acoplado al transbordador puede trabajar en forma independiente para capturar y poner en órbita cargas pesadas, pero, desde



**Figura 10.12** Aplicaciones de los operadores teledirigidos: (a) recuperación de un teleoperador en vuelo libre por medio de un teleoperador acoplado a un transbordador espacial, (b) un sumergible tripulado, (c) Hardiman, una máquina exoesquelética, (d) un camión "caminante".

un punto de vista sólo energético, puede resultar mucho menos costoso colocar el Orbitador en una órbita cercana a la Tierra y lanzar el teleoperador en vuelo libre a las órbitas geosincrónicas superiores en donde se encuentran la mayoría de los satélites. El brazo de un teleoperador acoplado al transbordador tiene una extensión característica de 20 metros y puede tener siete grados de libertad; esta libertad adicional permite una ubicación independiente del codo para evitar posibles peligros. El teleoperador en vuelo libre no tripulado se controla desde el transbordador y su empleo retiene las ventajas de una misión tripulada y además elimina las desventajas derivadas de suministrar sistemas remotos para soportar la vida y de protección contra peligros. Debe notarse que el teleoperador en vuelo libre mostrado en la figura cuenta con cuatro brazos: dos para sujetar y dos para trabajar.

### **Aplicaciones oceanográficas**

Los últimos veinte años han sido testigos de un rápido crecimiento en la explotación del suelo oceánico. Gran parte del trabajo a profundidades de hasta 200 metros lo han llevado a cabo buzos pero, como la mayoría del suelo oceánico se encuentra a profundidades de hasta 3 kilómetros, las

ventajas derivadas de la destreza y flexibilidad de los buzos humanos se están viendo superadas por un creciente número de desventajas (Datta y Kuo, 1978). Los buzos expuestos al mar abierto experimentan condiciones extremas de frío y presión; y esta última presenta un problema particularmente difícil. En profundidades mayores a 20 m la presión corporal interna del buzo debe aumentarse para igualar la presión hidrostática externa. Esto produce algunos riesgos asociados: una compresión demasiado rápida puede provocar un "síndrome nervioso de alta presión"; una descompresión demasiado rápida puede provocar un ataque de la enfermedad de los buzos (enfermedad de la descompresión). El suministro de una mezcla adecuada de gases para la respiración del buzo también presenta complicaciones propias. El aire es satisfactorio para profundidades de hasta 50 m, pero a mayores profundidades es necesario utilizar helio. El porcentaje de oxígeno debe controlarse; se debe eliminar el contenido de bióxido de carbono; se debe evitar el envenenamiento por nitrógeno y es posible que sea necesario recurrir a un desmezclador de helio para compensar los efectos de distorsión de la voz.

Estos problemas pueden evitarse mediante el uso de sumergibles (submarinos) tripulados (Busby, 1976), ya sea para nado libre o dependiente de una nave nodriza (figura 10.12(b)). Estos dispositivos permiten al operador permanecer en la relativa seguridad de una cabina sellada que se mantiene a una temperatura y presión ambientes normales. De hecho, en algunos casos no es conveniente que el operador esté cerca del área de trabajo, por lo que resulta mucho más adecuado contar con sumergibles no tripulados controlados en forma remota desde una nave nodriza (Charles y Vertut, 1977). Esto elimina la necesidad de contar con un casco de gran resistencia y un sistema para mantener la vida.

Con los brazos del teleoperador acoplados al sumergible, el operador puede llevar a cabo una gran variedad de tareas. Como en el caso de las aplicaciones espaciales también aquí es necesario, como consecuencia de la fuerzas y pares de reacción, utilizar un retén para anclar el sumergible a la pieza de trabajo. Además, debido a la escasa visibilidad a grandes profundidades, y en ciertas aplicaciones en particular, es conveniente aprovechar las propiedades reflejantes de fuerza de los operadores bilaterales (Hotta y colaboradores, 1977).

Las aplicaciones submarinas de los teleoperadores pueden clasificarse en tres categorías principales: científicas, comerciales y militares (Johnsen y Corliss, 1969). Las investigaciones científicas incluyen estudios biológicos, botánicos y geológicos. El uso de manipuladores para el muestreo selectivo de rocas, conchas y lodo es preferible a las características de incertidumbre de un dragado. Las aplicaciones comerciales están dominadas en la actualidad por la construcción y el mantenimiento de pozos petroleros, pero existen muchas otras áreas en donde se pueden utilizar.

teleoperadores submarinos: salvamento, fotografía, construcción de barcos y reparación y mantenimiento de puertos, por ejemplo.

En el área militar desde hace tiempo ha existido la necesidad de recuperar armas prototipo y de práctica; la recuperación de la famosa bomba H frente a las costas de España en 1966 motivó importantes investigaciones en el campo de los teleoperadores submarinos. Otra aplicación ya contemplada es el uso de operadores teledirigidos para la instalación y el mantenimiento de estaciones militares marinas.

### ***Máquinas cibernéticas antropomórficas***

Los ingenieros de la *General Electric Company* propusieron este nombre impresionante para aquella clase de teleoperador en la cual el operador y la máquina están tan estrechamente interrelacionados que pueden considerarse como un sólo ente. Dos ejemplos, ambos diseñados por *General Electric*, se presentan en las figuras 10.12(c) y (d). El Hardiman, una máquina exoesquelética o amplificador humano (GEC, 1968), se construyó en 1966 para aplicaciones militares: el "camión caminante" (Lefer, 1970), que también se construyó con una aplicación militar en mente, dio sus primeros pasos en 1968.

El operador del Hardiman se colocaba dentro de una estructura antropomórfica construida con base en dos mitades unidas a la altura de las caderas. Cada una de las mitades contaba con quince grados de libertad. El exoesqueleto era paralelo en todos aspectos a la estructura humana con la excepción de los antebrazos, en donde los brazos del operador eran colineales a los antebrazos del exoesqueleto. La potencia se suministraba desde un sistema hidráulico que operaba con una presión de 200 bar. Se utilizaron servos electrohidráulicos bilaterales con relaciones de fuerza entre maestros y esclavos de aproximadamente 25. Con esta amplificación la máquina era capaz de levantar y manipular una masa de aproximadamente 100 kilogramos y transportarla a una distancia de 8 metros en 10 segundos.

Las máquinas exoesqueléticas son potencialmente peligrosas para el ser humano sobre las que están instaladas. ¿Qué sucedería si fallara el suministro de potencia y la estructura se derrumbara? ¿Qué sucedería si la máquina se tornara inestable? Estos problemas recibieron mucha atención por parte de los diseñadores de *General Electric* y sus soluciones incluyeron el aseguramiento automático de los accionadores en caso de que fallara la presión, así como el enlace físico de los miembros para evitar la acumulación de pequeños errores entre el maestro y el esclavo.

Los trabajos realizados con el Hardiman contribuyeron en forma considerable al avance del programa del camión caminante que se inició aproximadamente al mismo tiempo. En el capítulo 3 se analizaron las diversas ventajas de los vehículos con patas sobre los vehículos con ruedas

y se mostró cómo podría lograrse que un robot caminara con un paso programado. En el ejemplo que ahora se presenta se han combinado las ventajas de control de un teleoperador y de un vehículo con patas. El resultado es una máquina con un peso de 1500 kg, una longitud de 4 m y una altura de 3.6 m con patas de 2 metros de largo, capaz de moverse a una velocidad aproximada de 1 m/s sobre una superficie nivelada. La máquina se impulsaba con un motor de gasolina de 70 kW.

La máquina seguía los movimientos del operador, cuyos brazos y piernas impulsaban controladores de réplica. Los brazos del operador controlaban las patas delanteras de la máquina y sus piernas las patas traseras. Se utilizaban servos hidromecánicos bilaterales operando a 200 bar para multiplicar las fuerzas del operador por aproximadamente 120 y sus movimientos por cerca de 4. El operador debe controlar en forma simultánea 12 servos de posición y responder a fuerzas generadas por 12 actuadores en cada una de las patas de la máquina. La intención es que, con la estrecha interrelación entre el operador y la máquina, el operador tiene solamente que realizar un sencillo movimiento de gateo para lograr que el cuadrúpedo se mueva y, al mismo tiempo, amplifique y extienda todos sus movimientos. La máquina mostró gran habilidad para andar hacia adelante y hacia atrás, para balancearse sobre patas colocadas diagonalmente, para ascender obstáculos, levantar masas de hasta 200 kg y dar la vuelta. A pesar de todas estas ventajas el proyecto no pasó de la etapa inicial de construcción del prototipo; se supone que las razones se basaron en la dificultad de los problemas de control enfrentados tanto por la máquina como por el operador.

### **10.8 Teleoperadores para minusválidos**

En esta sección se analizan dos importantes áreas de aplicación para los operadores teledirigidos: (i) prótesis para el reemplazo de miembros faltantes debido a defectos congénitos o perdidos como consecuencia de un accidente o violencia, y (ii) manipuladores controlados en forma remota para la rehabilitación de personas paralíticas.

#### ***Miembros artificiales***

El diseño y fabricación de miembros artificiales presenta un reto en particular difícil para el ingeniero. El peso, la confiabilidad, el impulso, el consumo de energía, la facilidad del control, la cosmética y el costo son sólo algunos de los factores que deben tomarse en cuenta (Jacobsen y colaboradores, 1982; Peizer y colaboradores, 1969). Las restricciones de peso, por ejemplo, son al menos tan severas como las encontradas en el diseño de aeronaves, dado que aun cuando el brazo natural tiene una masa

cercana a 4 kg, una prótesis con una masa superior a 1.5 kg sería inaceptable.

La elección de una fuente de poder es otra área debatible. Se vio antes que la energía generada por los movimientos corporales tiene sus atractivos, pero su uso queda restringido a los dispositivos más sencillos. Las baterías eléctricas brindan la forma más ligera y compacta de fuente externa de energía, pero estas ventajas pueden verse desplazadas por la masa relativamente grande de la combinación de un motor y una caja de engranes de reducción requerida para cada grado de libertad. Los dispositivos neumáticos, con una masa reducida y una alta respuesta, son otro de los principales contendientes; la potencia en este caso proviene de tanques de gas licuado a presión, generalmente bióxido de carbono. Ya sea que se utilicen baterías o tanques, es necesario resolver el problema de su agotamiento y recarga. En la tabla 10.1 se compara el rendimiento de las versiones neumática y eléctrica de la prótesis manual Otto Bock (Schmidl, 1977). El paquete neumático de fuerza motriz consiste de 48 g de bióxido de carbono a 5 bar, en un tanque con una masa de 350 g y con dimensiones  $36 \times 140$  mm. La fuerza motriz eléctrica se obtiene de una batería recargable de níquel y cadmio de 12 V con una capacidad de 450 mA, una masa de 280 g y dimensiones  $16 \times 58 \times 150$  mm.

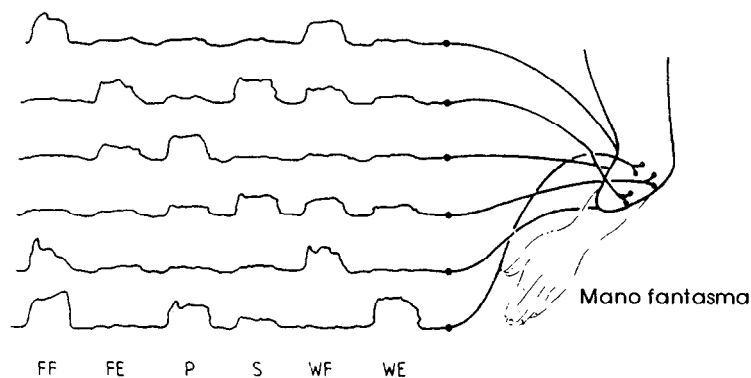
Tabla 10.1

	<i>Neumáticas</i>	<i>Eléctricas</i>
Presión/potencial	5 bar	12 V
Apertura máxima	65 mm	100 mm
Presión máxima de sujeción	7 kN/m <sup>2</sup>	15 kN/m <sup>2</sup>
Velocidad	45 mm/s	80 mm/s
Masa	340 g	450 g
Número de sujeciones por carga	1300	4200

La facilidad del control es otro factor que merece discutirse. Muchos trabajos de investigación se han concentrado en el empleo de señales electromiográficas para el control de los miembros artificiales. Uno de los principales problemas en este tipo de aplicaciones es la dificultad para obtener suficientes señales de control independientes generadas por el cuerpo para controlar todas las funciones resultantes requeridas. Se ha tratado de solucionar este problema atacándolo desde dos frentes distintos. En el primero, la amplitud de la señal electromiográfica procesada se utiliza para definir varios estados de salida mediante el empleo de circuitos de frecuencia crítica. Por ejemplo, una señal de alto nivel generada en un cierto lugar puede usarse para impulsar un actuador de codo mientras que

una señal de bajo nivel generada en el mismo lugar puede impulsar un accionador de muñeca (During y Nittenburg, 1967). Una aplicación impresionante de esta técnica puede verse en las prótesis manuales diseñadas por el Grupo de Control en la Universidad de Southampton (Swain y Nightingale, 1981). Estos dispositivos requieren la substracción de las señales electromiográficas procesadas provenientes de músculos antagonistas, como los músculos flexor y extensor del antebrazo o, para amputaciones por encima del codo, el tríceps y el bíceps. Mediante la selección de distintos niveles de esta señal de control el paciente pudo emitir comandos para *sujetar, apretar, maniobrar, soltar y abrir la mano*.

Otro método para controlar múltiples salidas utiliza técnicas de reconocimiento de patrones. La mayoría de las personas que sufren una amputación retienen una imagen cortical del miembro perdido, que es el fenómeno de percepción de un miembro fantasma. La persona que carece de un miembro, al imaginarse los movimientos de éste, envía señales a los músculos restantes o a segmentos musculares que habrían sido utilizados para los movimientos imaginarios del miembro normal. Por ejemplo, una persona con una amputación por debajo del codo que intenta levantar su mano fantasma contrae los músculos con que aún cuenta en el muñón del antebrazo. Se ha demostrado que distintas salidas necesarias, como la flexión y la extensión de los dedos, generan patrones distintos de señales electromiográficas procesadas para estos músculos. Esto se ilustra en la figura 10.13 en la que se muestra el patrón generado por las señales de seis lugares de control cuando un paciente requiere seis acciones diferentes de una mano fantasma (Johnsson y colaboradores, 1981). Para la flexión de un dedo (FF), leyendo de arriba hacia abajo, el patrón se describiría como



**Figura 10.13** Reconocimiento de patrones para el control de múltiples salidas: FF = flexión del dedo, FE = extensión del dedo, P = pronación, S = supinación, WF = flexión de la muñeca, WE = extensión de la muñeca.

100011 y para la extensión del dedo (FE) como 011000. Estos patrones pueden usarse para clasificar e identificar los movimientos requeridos de la mano. Con  $n$  sitios de control es teóricamente posible generar hasta  $2n$  salidas. El control es natural ya que no es necesario que el operador se concentre en las entradas de control.

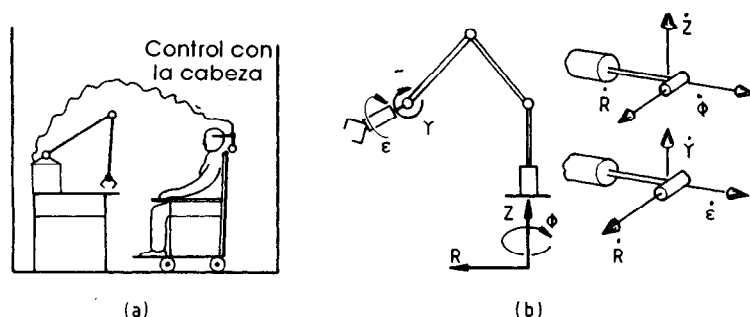
Problemas en particular difíciles se presentan en el caso de personas con amputaciones a niveles superiores que han perdido la mayor parte del brazo. Estas personas requieren prótesis de hombros y brazos y, dado que se han perdido la mayoría de los grupos musculares relacionados con el movimiento del brazo, resulta difícil obtener señales de control directas para accionar cada uno de los grados de libertad de la prótesis. Swain y Nightingale (1981) plantearon una solución interesante a este problema; en ella el paciente impulsa la mano en coordenadas reales por medio de movimientos del hombro y del resto del cuerpo. La elevación de los huesos del cuello permite levantar la mano (Z), su movimiento hacia adelante y hacia atrás hace que la mano realice un seguimiento espacial (X) y la rotación de la parte superior del cuerpo hacia la izquierda y hacia la derecha hacen que la mano siga en la dirección Y. Estos movimientos corporales se detectan por medio de potenciómetros montado en un arnés especial. Las transformaciones necesarias de coordenadas reales a coordenadas de máquina se llevan a cabo con un microprocesador.

### ***Teleoperadores para cuadraplégicos***

Uno de los propósitos básicos de los operadores teledirigidos es dar a las personas acceso a regiones que por lo general les resultan inaccesibles. En el caso de los cuadraplégicos esta región inaccesible es el medio inmediato. Se han desarrollado dos técnicas principales para ayudar a estas personas: *órtesis* y *telétesis*. Las órtesis, en la forma de soportes exoesqueléticos y actuadores impulsados en forma externa, se han usado en la ingeniería de rehabilitación; las órtesis motorizadas controladas por medio de computadoras han hecho posible mover brazos paralizados para llevar a cabo ciertas manipulaciones (Correll y Wijnschenk, 1964). Sin embargo, la construcción de estos dispositivos es difícil y dado que la mayoría de los miembros paralizados no tienen sensibilidad, existe el peligro de que la órtesis o los factores presentes en el ambiente lesionen en forma inadvertida el brazo de la persona incapacitada.

Las telétesis, por otra parte, ofrecen un auxiliar útil y práctico para los cuadraplégicos. Telétesis es el nombre dado (Guitte y colaboradores, 1977) a aquella clase de sistemas teledirigidos para minusválidos que, a diferencia de las prótesis y las órtosis, no están acoplados en forma directa al cuerpo del operador. En la figura 10.14(a) se muestra una telétesis en la forma de un brazo manipulador accionado por los movimientos de un operador incapacitado. Es importante que la telétesis esté situada en un ambiente ordenado que esté adaptado a la destreza y





**Figura 10.14** Telétesis para cuadraplégicos: (a) uso de los movimientos de la cabeza, (b) un controlador de movimiento y velocidad resueltos que utiliza tres entradas para impulsar cinco coordenadas de máquina.

versatilidad del sistema de manipulación (McGovern, 1977). La persona minusválida se sienta en el centro de este ambiente, en donde puede observar todas las actividades del manipulador. Los alcances de las actividades deberán contar con límites para evitar que los objetos queden fuera de alcance. Es necesario suministrar espacios de almacenamiento y si éstos se encuentran más allá del alcance del manipulador, entonces será necesario contar con algún tipo de sistema de bandas, charolas o entrepaños móviles para transportar los objetos desde y hacia el espacio de trabajo.

Una dificultad importante se deriva del número suficiente de señales de entrada. En la figura 10.14(b) se muestra cómo un manipulador de brazo articulado con cinco grados de libertad puede accionarse por medio de una palanca de mando con tres grados de libertad operada con la cabeza como las ya antes descritas (Schmaelenbach y colaboradores, 1978). Su operación como un control remoto de velocidad resuelto, requiere que se definan dos modos de control: uno para los movimientos generales para ubicar las tenazas, cuando el dispositivo de control de entrada controla  $Z$ ,  $\phi$  y  $R$  y uno para la orientación y la ubicación fina de las tenazas cuando se controlan  $\gamma$ ,  $\epsilon$  y  $R$ . Las señales discretas para la conmutación entre los modos de control y para la operación de las tenazas se obtienen de interruptores accionados por la lengua, de soplar o aspirar por el pequeño orificio del posicionador bucal. Este sistema permitió a un operador minusválido realizar una gran variedad de tareas en un tiempo corto. Por ejemplo, fue posible operar un estante giratorio impulsado por medio de un motor usando un interruptor, tomar un libro del estante, colocarlo sobre una superficie y abrirlo, todo en un minuto y medio.

El control de la velocidad parece ser la mejor forma de controlar una telétesis. En casos de emergencia, el manipulador se detiene en forma rápida cuando se libera la palanca de mando; se puede mantener una cierta posición del manipulador, alcanzada posiblemente después de un considerable esfuerzo por parte del operador, si él desea tomar un ligero des-

canso. En el caso citado por McGovern (1977) la señal analógica de la palanca de mando se dividió en tres intervalos. El primero, que representaba cerca del 10 % del movimiento de la palanca de mando, se reservó para movimientos perdidos y para evitar movimientos no intencionados del manipulador como los provocados por golpes accidentales a la palanca. En el segundo intervalo, otro 10 %, los actuadores se impulsaban muy lentamente, lo cual es una característica muy útil durante el proceso de aprendizaje y para lograr una ubicación precisa. En el tercer intervalo, la velocidad era proporcional al desplazamiento de la palanca de mando.

Por lo que respecta a la seguridad se determinó (Guitte y colaboradores, 1979) que la relación entre el movimiento de la cabeza y los movimientos hacia adelante y hacia atrás de las tenazas era importante. En términos ergonómicos parecería que el arreglo más satisfactorio sería uno en el cual las tenazas se movieran en la misma dirección que la cabeza. Sin embargo, esto podría llevar a un sistema inestable. Por ejemplo, si se estableciera un contacto entre las tenazas o un objeto transportado por ellas, y la cabeza, entonces al retirarse la cabeza se haría que ésta se empujara todavía más hacia atrás. Lo anterior puede evitarse invirtiendo la correspondencia espacial entre los movimientos hacia adelante y hacia atrás de la cabeza y las tenazas a costa de una capacitación más extensiva del operador.

### **10.9 Expansión a través de una computadora**

Algunos de los teleoperadores antes descritos utilizan computadoras para auxiliar al operador humano. En algunos casos las complicadas transformaciones de coordenadas reales a coordenadas de máquina se delegaron a la computadora, con lo que se redujo en gran medida la dificultad de la tarea que debía realizar el operador humano. La expansión de los sistemas teledirigidos por medio de una computadora ofrece muchas ventajas. Algunas tareas en extremo complejas (Sword y Park, 1977) pueden llevarse a cabo al combinar la habilidad del ser humano para planear, interpretar y reaccionar ante lo imprevisto con la habilidad de la computadora para detectar, almacenar, procesar y repetir señales a través de múltiples canales.

Estas diferencias características entre los atributos de las personas y de las máquinas sugieren una estructura de control con diversos grados de participación humana y de la máquina. Se han identificado tres niveles principales (McGovern, 1977): control manual, control expandido e inteligencia artificial. Con el control manual, como ocurre en los teleoperadores maestro y esclavo tradicionales, el operador humano lleva a cabo todas las tareas de medición, procesamiento y control de señales y suministra todos los comandos requeridos por el sistema. En el otro extremo, el de la inteligencia artificial, el sistema está por completo bajo el control de la computadora y actúa como un robot autónomo.

Entre estos extremos se aprecia un medio continuo de esquemas de control en los cuales la máquina incrementa la capacidad del operador humano en diversos grados. Existen dos áreas distintas de expansión en el control: control con supervisión y control automatizado. En la modalidad supervisada, el control se transfiere en forma intermitente entre el operador y la computadora, mientras que en el control automatizado el operador humano y la computadora trabajan juntos; cada uno es responsable de una función individual.

McGovern (1977) describió un experimento relacionado con el control supervisado, en el cual la tarea consistía en sujetar y manipular bloques. El operador humano tenía que mover el efector final hasta que entraba en contacto con un bloque. Una vez lograda esta tarea, el control se transfería del operador a la computadora y se ejecutaba una rutina para sujetar el bloque. Cuando el bloque se sujetaba, el control se regresaba al operador humano. Un ejemplo práctico de un esquema similar de control consistía en la localización y obtención de pequeñas bombas en la sección de nariz de un cohete (Sword y Park, 1977). En este caso el operador ubicaba el efector final sobre la bomba utilizando señales orales y, en respuesta al comando "sujétala", una computadora PDP-10 ejecutaba una serie de rutinas que llevaban finalmente a la sujeción de la bomba. De nuevo, en la obra de Guitte y colaboradores (1979) se encuentra una descripción de una teléstesis para cuadraplégicos en la cual la tarea de manipulación de la persona minusválida se simplifica mediante el empleo de un reflejo de sujeción.

En el otro tipo de ampliación del control, o sea el control automatizado, el operador humano y la máquina trabajan en conjunto (Beczy, 1980). El empleo de computadoras para resolver transformaciones complejas es un ejemplo en donde la tarea de manipulación está integrada por esta responsabilidad dual. Otro ejemplo es la capacidad con que cuentan algunos manipuladores para aplicar un "toque suave" que les permite aplicar una fuerza apenas suficiente para evitar que los objetos se resbalen (Guitte y colaboradores, 1979). El operador no ejerce ningún control sobre esta función, sino que la misma se delega por completo a la computadora.

En la actualidad la ampliación del control es un tema sujeto a amplias investigaciones. ¿Cuál es el nivel óptimo de ampliación para una tarea dada? ¿Cuál de los papeles de supervisión del ser humano es el más importante: la planeación, la enseñanza, el monitoreo, la intervención?

### 10.10 Resumen

Los robots son automáticos, pero los teleoperadores dependen del ser humano para su control. Permiten extender las capacidades humanas más allá de las barreras impuestas por la distancia y el ambiente y, en la forma

de dispositivos como prótesis, órtesis y telétesis, pueden ser de gran ayuda para las personas incapacitadas.

Se ha establecido una comparación entre las estrategias de control de la velocidad y de la posición. Se demostró que los teleoperadores bilaterales, con su capacidad para retroaccionarse, son superiores a los del tipo unilateral: suministran la retroalimentación de fuerza que es esencial para un control preciso. El control bilateral se presenta en dos formas principales: sistemas de error común y sistemas con retroalimentación de fuerza.

Se ha analizado una gran variedad de dispositivos para control de entrada, incluyendo interruptores, palancas de mando, controles de réplica y entradas orales. En el caso de las personas incapacitadas, los movimientos de la cabeza, la boca o la porción presente de los miembros pueden usarse con fines de control. También se ha estudiado el uso de señales de voz y electromiográficas.

Se han descrito varios usos. Se dijo que es probable que sea necesaria cierta forma de aumento por medio de una computadora para casi todas las tareas, posiblemente con la excepción de las más sencillas.

# Capítulo 11

## *Factores económicos y financieros*

---

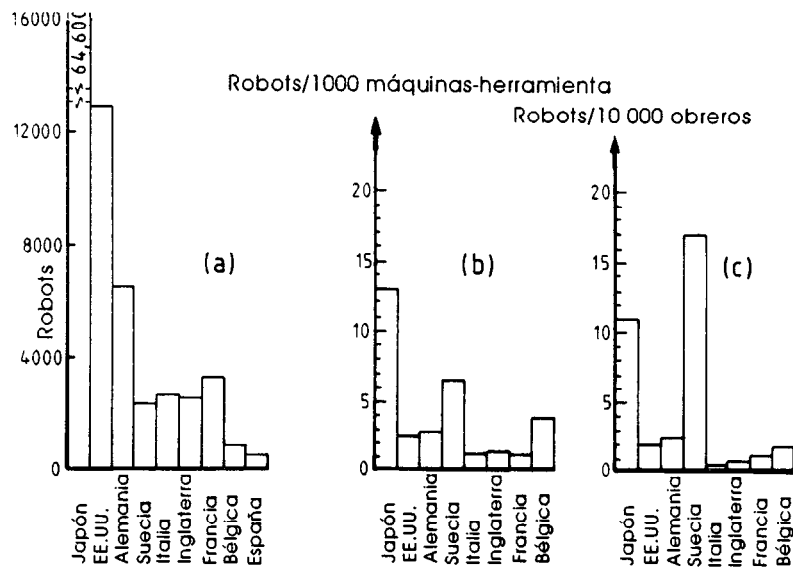
### 11.1 Introducción

Ahora se dirige la atención a los aspectos económicos y sociales de los robots. En este capítulo se ha de analizar la población mundial de robots así como la nueva industria que ha surgido en virtud de la cada vez mayor demanda de robots.

Para un usuario potencial, los costos tendrán gran influencia sobre la decisión de instalar o no un robot. Por lo tanto, los autores han considerado importante examinar algunos métodos de evaluación financiera.

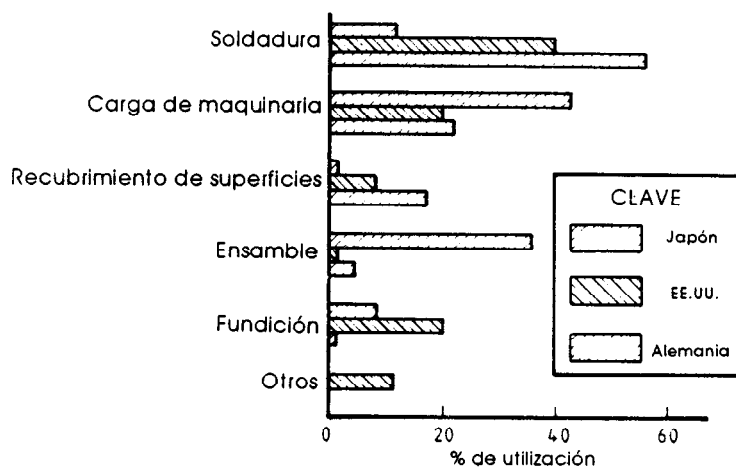
### 11.2 Población de robots

La población mundial de robots ha estado creciendo rápidamente desde que el primero de ellos fue instalado por *Unimation* en una planta de fundición en 1962. Cada año se publican cientos de estadísticas sobre el número de robots que existen en el mundo y las aplicaciones a las que se destinan. Una de las dificultades encontradas al comparar estadísticas de distintos países es la variación en la definición de las máquinas a que dichas estadísticas se refieren. Por ejemplo, una máquina que en Estados Unidos o en Inglaterra se clasificaría como de automatización fija, en Japón podría considerarse como un robot. El estudio llevado a cabo por la *British Robot Association* (Asociación Británica de Robots) al final de cada año (BRA, 1985) y publicada en febrero del año siguiente es particularmente útil dado que toma en cuenta estas diferencias en las definiciones y las cifras establecen comparaciones entre dispositivos similares. Las cifras de este estudio que se refieren al número de robots en distintos países ya se citaron en el capítulo 1 y se ilustran de nuevo aquí en la figura 11.1(a). Es



**Figura 11.1** Estadísticas de población de robots en 1984: (a) total en cada país, (b) número de robots en comparación con el número de máquinas herramienta, (c) número de robots con respecto a la población trabajadora.

interesante apreciar cómo estas cifras de población están relacionadas con la magnitud de la base industrial de cada país; en la figura 11.1 se presenta, para los ocho países con la mayor población de robots a nivel mundial, la proporción entre robots y trabajadores y máquinas herramienta. Japón y

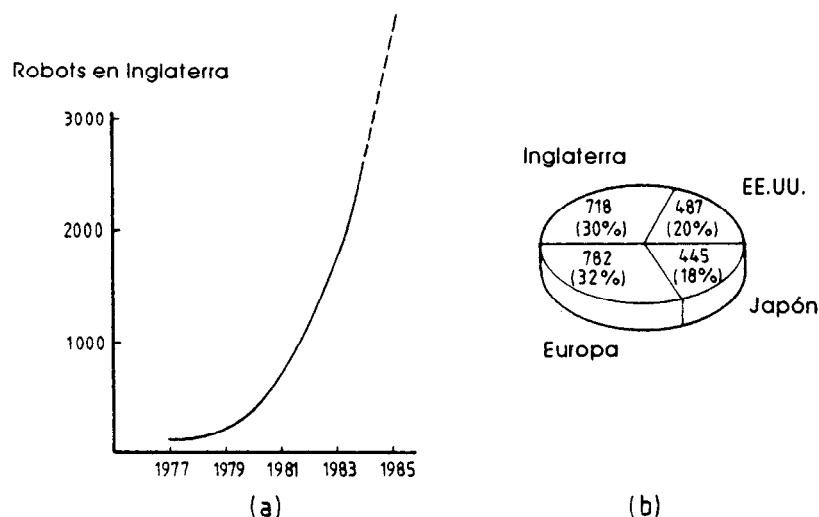


**Figura 11.2** Porcentaje de utilización de robots en Japón, Estados Unidos y Alemania Occidental.

Suecia sobresalen en ambos indicadores como los países más automatizados.

Los factores que contribuyen al grado de automatización en un país dependen tanto de los tipos de industria manufacturera prevalecientes en cada país como del nivel general de mecanización de la industria de dichos países (Gerstenfed y Berger, 1982); en la figura 11.2 se ilustra este punto mediante una comparación entre el porcentaje de robots en Japón, Estados Unidos y Alemania que se utilizan para distintas aplicaciones. Las cifras para Estados Unidos sirven como un punto de referencia muy adecuado dado que representan una amplia planta industrial. Las industrias automatizadas (desde motocicletas y automóviles hasta los vehículos industriales de gran tamaño) predominan en Alemania, lo que da pie para una extensa utilización de los robots en operaciones de soldadura (por ejemplo, soldadura por puntos para carrocerías automotrices) y recubrimiento de superficies (por ejemplo, pintado y sellado de carrocerías automotrices). El hecho de que un gran número de robots en Japón se utilicen en tareas de carga de máquinas y ensamble refleja la concentración de plantas que producen máquinas herramienta (incluyendo robots) y bienes de consumo en dicho país.

Con frecuencia la manufactura se clasifica en tres categorías distintas: manufactura sobre pedido o de componentes individuales específicos, producción en lote y producción en masa. Las estadísticas anteriores indican que los robots se están usando en una gran variedad de operaciones de manufactura desde la producción de lotes de tamaño medio hasta la

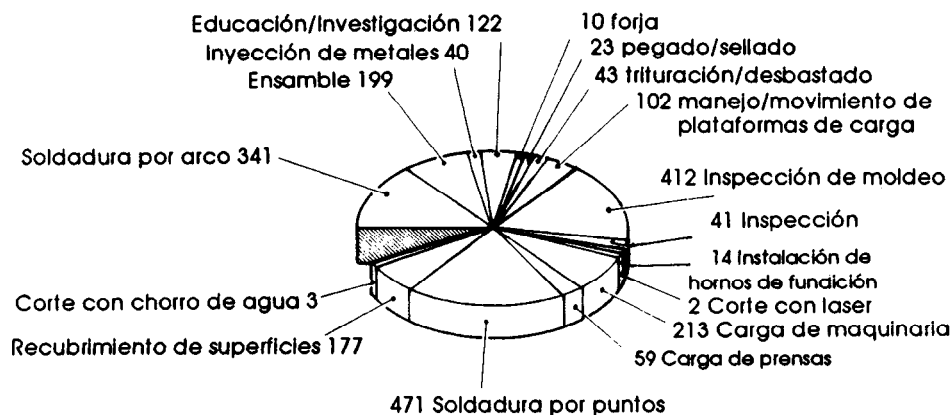


**Figura 11.3** Población de robots en Inglaterra: (a) crecimiento, (b) origen de los robots.

producción en masa. La capacidad de detección e inteligencia artificial de los robots son cada vez más accesibles para el usuario comercial; se espera que esto lleve a una mayor utilización de los robots en la producción de lotes de menor tamaño, en donde se requiere una inteligencia basada en sensores para enfrentar las variaciones en el trabajo y el ambiente asociadas con la producción de un número reducido de artículos. La importancia de esta tendencia no puede exagerarse: un estudio (Ross, 1981) ha indicado que la producción en lotes de 10 a 50 unidades representa más del 80 % de todos los productos manufacturados en el mundo.

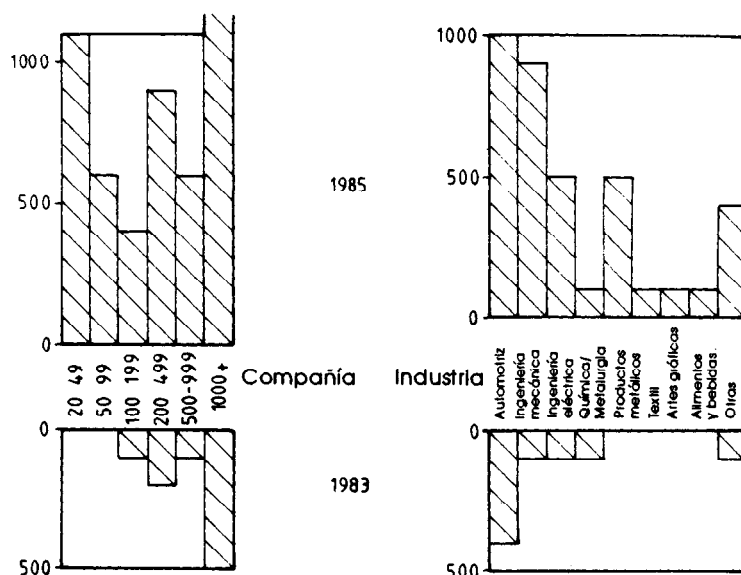
La discusión anterior parece indicar que la población de robots en Inglaterra todavía no alcanza su nivel máximo y este hecho lo confirma la figura 11.3(a) (BRA, 1984) en la cual se muestra el aumento registrado por la población de robots de Inglaterra en años recientes. Es interesante hacer notar que la población de robots en Inglaterra, considerada desde el punto de vista del número de aplicaciones distintas o del número de instalaciones distintas, está muy dispersa. Esto indica que muchas instalaciones que utilizan robots son parte de un primer experimento por parte de las compañías y que, en caso de tener éxito, facilitarían la puesta en marcha de proyectos mucho más ambiciosos, como consecuencia de la experiencia obtenida en las primeras instalaciones.

En la figura 11.3(b) se presenta el origen de todos los robots de Inglaterra. Aun cuando sólo el 30 % de los robots instalados a finales de 1984 se habían fabricado en Inglaterra, se sabe que el 33 % de los robots instalados en 1984 se fabricaron localmente. Más de la mitad de los proveedores de robots de Inglaterra venden máquinas fabricadas en ese país, lo que indica un importante crecimiento en la industria fabricante de robots de Inglaterra. Los países de Europa Occidental, con la excepción de Suecia y Alemania, no mostraron un esfuerzo concertado para lograr una producción automatizada cuando la tecnología apareció por primera vez en la



**Figura 11.4** Aplicación de los robots en Inglaterra.





**Figura 11.5** Utilización real (1983) y esperada (1985) de robots en Inglaterra clasificada por tamaño de compañía y tipo de industria.

década de los años sesenta; el reciente resurgimiento de esta área fue en realidad una reacción ante la competencia de otras regiones del mundo en donde los efectos de la automatización comenzaron a apreciarse en la forma de menores costos de producción y una mayor calidad. De esta forma, la demanda inicial de robots en Europa Occidental se ha satisfecho en gran parte a través de importaciones de los Estados Unidos, Japón y Escandinavia y esta demanda ha servido de motivación para el surgimiento y crecimiento de un mayor número de fabricantes locales de robots.

Las cifras correspondientes a las aplicaciones de los robots en Inglaterra se mencionaron inicialmente en el capítulo 1 y el número de robots en las principales áreas de aplicación se ilustra de nuevo en la figura 11.4. La lista sirve para confirmar que la mayoría de estos robots se destinan al reemplazo directo de tareas que antes se realizaban en forma manual. Dentro de la industria automotriz (incluyendo no solamente a los fabricantes de vehículos sino también a todos los fabricantes de componentes) se pueden encontrar la mayoría de las operaciones en las cuales resultan aplicables los robots así como el capital necesario para sustentar instalaciones de gran magnitud; así, las áreas de soldadura por puntos, recubrimiento de superficies y moldeo por inyección, aun cuando todavía no están saturadas, ya están muy bien establecidas. Se espera que los sectores de soldadura por arco, ensamble e inspección crezcan conforme progresa la tecnología de los sensores.

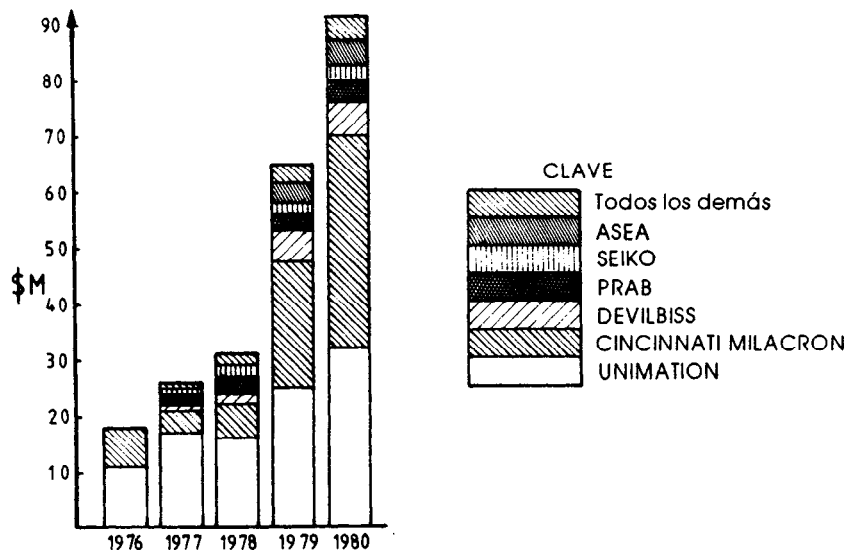
Se dijo antes que la población de robots en Inglaterra estaba muy dispersa, y esto se confirma al analizar la figura 11.5 en la cual se ilustran algunos de los resultados del estudio realizado por Northcott y Rogers (1984). El estudio calculó, con precisión de centenas, el número de robots en uso en 1983 y el número que se esperaba estuviera en uso en 1985, clasificados por tamaño de compañía y tipo de industria. Como podría esperarse, las compañías de menor tamaño y las industrias más tradicionales no han sido los primeros fabricantes en aventurarse al campo de la robótica; sin embargo, las expectativas para 1985 indican una mayor concientización respecto a la capacidad de los robots; además la demanda de máquinas más flexibles para manejar producciones en lotes pequeños por parte de las compañías más pequeñas ha motivado una mayor investigación y desarrollo en este campo. Estos comentarios resultan de igual modo aplicables a otras áreas de la automatización y se observan crecimientos estables, aunque no tan dramáticos, en estaciones de trabajo CAD, máquinas herramienta CNC, controladores lógicos programables y dispositivos para selección y colocación.

### 11.3 La industria de los robots

La moderna industria de los robots tiene sus raíces en muchas tecnologías distintas, en especial en la de los manipuladores (Babbitt diseñó un manipulador en 1892 (Patente Número 464 870 de Estados Unidos)), los servomecanismos y las computadoras. Las patentes obtenidas por Pollard en 1942 y Roselund en 1944 se relacionan con máquinas de pintura por rocío que, de hecho, llevaban a cabo las funciones de un robot de reproducción. La invención del robot se le acredita a George C. Devol, Jr. tomando en cuenta las patentes que registró en 1946. A partir de estos inventos se ha creado una industria de alcance mundial, que incluye no sólo el proceso mismo de fabricar robots, sino también a un sinnúmero de compañías de menor tamaño dedicadas a la fabricación de los componentes (mecánicos, electrónicos y de *software*) necesarios, al diseño y manufactura de dispositivos periféricos (por ejemplo, tenazas especiales, sistemas de visión) y al mantenimiento y otras funciones de servicio.

Las patentes originales de Devol fueron adquiridas por la *Consolidated Diesel Corporation* (CONDEC), que estableció una subsidiaria llamada *Unimation, Inc.* (nombre derivado de *UNiversal autoMATION*) con el fin de diseñar máquinas que pudieran usarse a nivel comercial, lo que condujo finalmente a la instalación del robot antes mencionado en 1962.

En 1974, la compañía Renault, firma francesa fabricante de automóviles, consideró que existía la posibilidad de utilizar robots en sus operaciones de manufactura e inició un proyecto de investigación para la



**Figura 11.6** Crecimiento de la participación en el mercado de los fabricantes de robots.

fabricación de robots a utilizarse en las operaciones de producción de la empresa. Posteriormente Renault se convertiría en fabricante y proveedor de robots industriales para el mercado en general.

También en 1974, apareció el primer robot controlado por medio de una microcomputadora, el T<sup>3</sup> (*Tomorrow Tool Today* o herramienta del mañana hoy) fabricado por la *Cincinnati Milacron Corporation*, que es una compañía fuerte dedicada a la fabricación de máquinas herramienta.

Estos tres ejemplos ilustran en forma adecuada los orígenes tan distintos que han tenido los fabricantes de robots. Muchos de los principales fabricantes de robots son compañías nuevas que se constituyeron en forma específica para fabricar robots. Otras se han creado por usuarios potenciales de robots quienes, después de diseñar robots para uso interno, descubrieron que sus máquinas podían usarse no sólo en sus compañías sino que también podían venderse a otras empresas, por ejemplo, *General Motors* o *IBM*. En muchos aspectos un robot es sólo otra máquina herramienta, por lo que la tecnología es una extensión natural de las actividades de fabricantes de máquinas herramienta ya establecidos; el diseño de los productos ASEA a partir de un equipo automático de soldadura para convertirse en robots para soldadura y después en robots de uso general, parece por lo tanto un proceso lógico.

En la figura 11.6 se muestra el crecimiento en participación de mercado de los principales fabricantes de robots del mundo. Un resumen

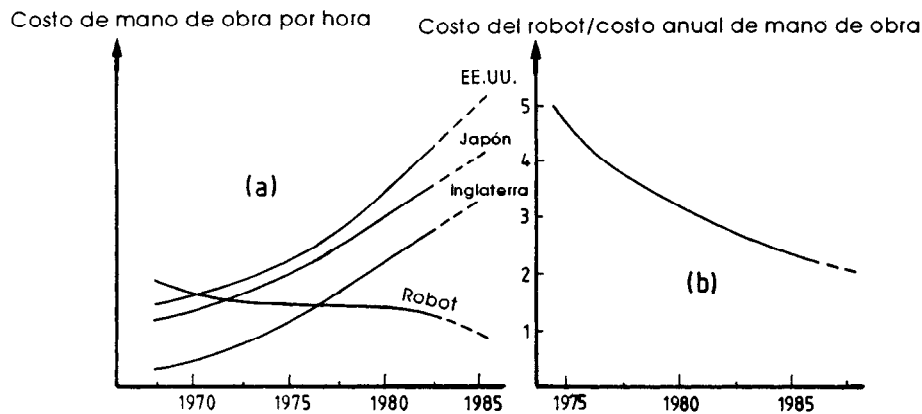
más extenso de los sistemas de robots industriales disponibles en Estados Unidos puede consultarse en la fuente de esta gráfica (Hunt, 1983).

La situación de la industria de los robots en Inglaterra con frecuencia se evalúa a través de una comparación directa con las industrias de Estados Unidos y del Japón. Esto puede llevar a conclusiones equivocadas dado que las industrias de estos países se sustentan en importantes mercados domésticos. La industria de los robots en Inglaterra puede compararse en forma más adecuada con las industrias de Francia, Italia y Bélgica, dado que estos países tienen mercados similares a los de Inglaterra (figuras 11.1 y 11.2).

Se mencionó antes que los fabricantes de Inglaterra han incrementado su participación de mercado, alcanzando un 34 % en 1983, pero un análisis exacto de la situación resulta difícil debido a lo complicado de la naturaleza de esta industria. Los tres principales fabricantes, ASEA, *Cincinnati Milacron* y *Unimation*, venden sus modelos en Inglaterra, pero *Unimation* lleva a cabo sólo parte de sus operaciones de fabricación en Inglaterra. La mayoría de los robots japoneses se importan en forma directa, por ejemplo los robots Daros fabricados por el grupo *Dainichi-Kiko* en Japón e importados por *Dainichi-Sykes Robotics Ltd.* Los contratos de otorgamiento de licencias tendrán un papel importante en la fabricación de robots; algunos ejemplos notables de esto son GEC, cuyo convenio con *Hitachi* les permitirá aumentar la gama de robots heredados de *Hall Automation* y el Grupo 600, que ha celebrado un convenio de manufactura con *Fujitsu Fanuc*. Los datos completos sobre los robots disponibles en Inglaterra pueden consultarse en el *UK Robots Industry Directory* (Directorio de la Industria de Robots de Inglaterra) (BRA, 1984); puede obtenerse información similar para Europa y Estados Unidos en Cugy (1984) y Hunt (1983), respectivamente.

#### 11.4 Justificación financiera de la robótica

Muchos industrialistas (Yonemoto, 1981) consideran que la potencial reducción de los costos de mano de obra es la ventaja más atractiva de los robots (véase el capítulo 1). La década de 1970 a 1980 fue testigo de la disminución del costo de operación por hora de un robot con respecto al costo de mano de obra por hora en los países industrializados (Lewis y colaboradores, 1983) (figura 11.7(a)) y se espera que esta situación continúe favoreciendo a los robots. Si el objetivo principal es la reducción de los costos de mano de obra, entonces será necesario contar con métodos que permitan determinar si la inversión en una instalación (el costo de capital del equipo) justifica el rendimiento (los ahorros derivados de la reducción en los costos de mano de obra).



**Figura 11.7** Costos de mano de obra y de operación de robots: (a) aumento en el costo de mano de obra por hora conforme disminuye el costo de operación de los robots, (b) caída en la relación de costos de robots/mano de obra.

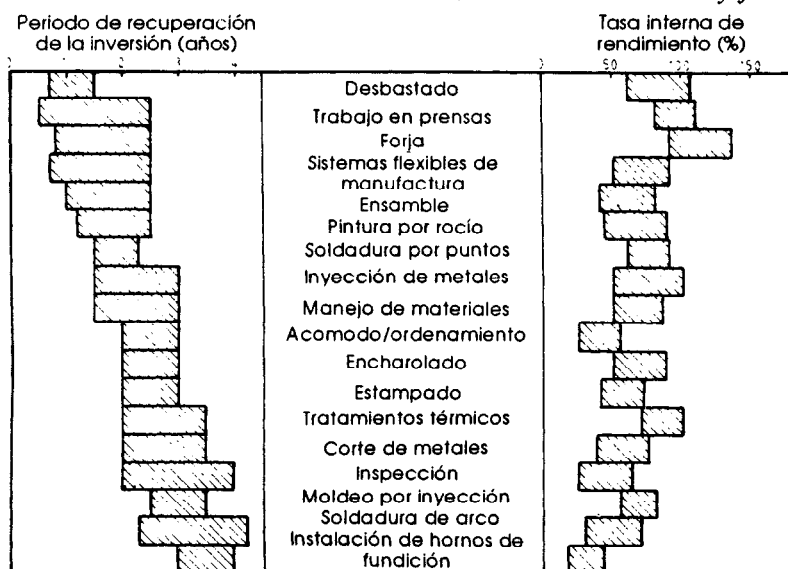
### **Periodo de recuperación de la inversión**

Considérese primero la justificación económica de reemplazar un trabajador manual por un robot. La regla más simple establece un límite permisible para la inversión; este límite se expresa en términos del número de años de costos de mano de obra que compraría la inversión. Esta regla supone que los costos de operación del robot son insignificantes (en la figura 11.7(a) se demostró cierta justificación para esto). Como los salarios aumentan, considérese un 7 % anual y el precio promedio del robot no cambia, en la figura 11.7(b) (Kuwahara, 1982) se aprecia que las instalaciones en las que se realiza un reemplazo directo de robots por trabajadores manuales resultarán más atractivas sobre esta base.

En realidad, además del costo inherente del robot, se requiere tiempo para planear y determinar quien realizará la instalación. Durante esta etapa se incurre en gastos pero, una vez que el robot está en operación, dichos gastos se verán compensados en forma gradual por los ahorros resultantes. El proyecto alcanzará el punto de equilibrio al final del periodo de recuperación de la inversión. La mayoría de las actuales instalaciones con robots tienen periodos de recuperación que van de uno a cuatro años; en la figura 11.8 se muestra el intervalo de periodos de pago de aplicaciones recientes de robots (Lewis y colaboradores, 1983).

### **Costos unitarios**

Al analizar un sistema propuesto para manufactura automática es importante conocer la forma en la que los costos variarán de acuerdo con el índice de producción del sistema. La figura 11.9 nos da una idea de las tendencias.

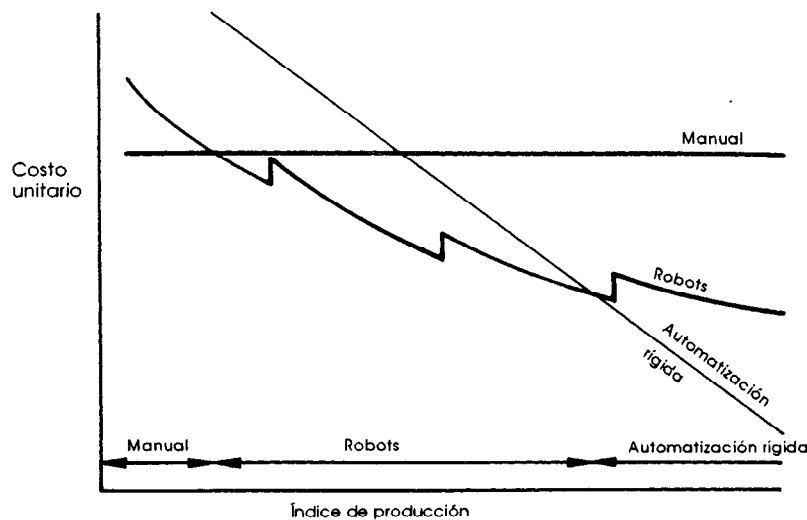


**Figura 11.8** Periodo de recuperación de la inversión y tasa de rendimiento interno para aplicaciones de robots.

En dicha figura se aprecia que el costo de producir una unidad en forma manual tiende a ser constante ya que un trabajador puede producir solamente un número fijo de unidades en un tiempo dado. Por otra parte, dentro de los límites de producción del sistema, los costos unitarios de una automatización fija se reducen en forma lineal de acuerdo con el aumento en el índice de producción. Entre más unidades pueda producir una máquina dada, mejor.

Si se considera el costo de capital del equipo, con menores índices de producción los sistemas robot tienen mayores costos unitarios que los sistemas manuales. En forma inversa, y por la misma razón, tendrán menores costos unitarios que una automatización fija. En el extremo de mayor índice de producción, los robots no pueden competir con la capacidad de producción en masa de la automatización de las funciones básicas. De aquí que, según se aprecia en la figura 11.9, los sistemas robot encuentran sus aplicaciones más eficaces en sistemas con un índice promedio de producción (Scott y Husband, 1983).

Para ser precisos, los costos unitarios son la suma de las contribuciones de los costos fijos, que son independientes del índice de producción, y los costos variables que dependen del número de unidades producidas. Los costos fijos incluyen la depreciación y la proporción de gastos fijos asignados al robot. La depreciación anual del equipo se deriva de la diferencia entre su costo de capital y el valor de amortización distribuida



**Figura 11.9** Variación del costo unitario con el índice de producción para sistemas manuales, flexibles y dedicados.

a lo largo de su vida útil. Los costos variables incluyen el costo de las materias primas, la mano de obra y el costo de operación de la maquinaria.

Un producto se fabrica en forma manual con una producción anual de 480 000 unidades. ¿Resultaría más eficaz un sistema automático de ensamble y, en caso afirmativo, cuál sería el tipo más eficaz? Owen (1982a) cita el siguiente ejemplo que sirve para ilustrar los cálculos correspondientes:

#### **Sistema manual existente**

4 trabajadores a 4 000 libras esterlinas por año por turno individual  
 5 % de rechazos  
 1 trabajador de inspección a 6 000 libras esterlinas por año  
 Duración del ciclo: 5 s

#### **Sistema de automatización flexible propuesto**

Costo de capital: 40 000 libras esterlinas  
 Depreciación a valor cero después de cinco años  
 Duración del ciclo: 10 s

#### **Sistema de automatización fija propuesto**

Costo de capital: 100 000 libras esterlinas  
 Depreciación a valor cero después de cinco años  
 Duración del ciclo: 1 s

	Manual		Automaización fija		Automaización flexible	
	libras	esterlinas	libras	esterlinas	libras	esterlinas
Costo del sistema		500		100 000		40 000
Depreciación				20 000		8 000
Costo fijo		7 000		27 000		15 000
Costos variables		3		2.95		2.95
Precio de venta		5		5		5
Equilibrio a		3 500		13 170		7 317
Costo de producción		1 447 000		1 443 000		1 431 000
Reducción de costos en comparación con producción manual				4 000		16 000
Periodo de recuperación de la inversión				25 años		$2\frac{1}{2}$ años
Costo unitario		3.0145		3.0062		2.9812

El sistema de automatización flexible se justifica sobre la base del costo unitario. Los cálculos no suponen ningún ahorro debido a reducciones en el índice de rechazos o a la posibilidad de eliminar las actividades de inspección; la aplicación de estos supuestos reduciría el periodo de recuperación de la inversión a 1.09 años.

### *Flujo de efectivo descontado*

Al analizar el flujo de efectivo de un proyecto a lo largo de un cierto periodo de tiempo, es necesario considerar el hecho de que una cantidad de dinero recibida en alguna fecha futura no valdrá tanto como la misma cantidad si se recibe el día de hoy; esto se debe básicamente a que el dinero, disponible en este momento, puede invertirse y puede por lo tanto generar intereses. La técnica de flujo de efectivo descontado permite que los flujos de efectivo futuros sean ponderados en forma adecuada de tal modo que puedan compararse de manera directa con los valores presentes. Aunque sólo es posible usar tasas de interés estimadas, la técnica es importante por dos razones. Primero, permite realizar una comparación real entre distintas instalaciones en donde pueden lograrse ahorros a través de escalas de tiempo extremadamente variables y, segundo, cualquier proyecto de capital debe pasar cuando menos la prueba contable básica de poder generar un mejor rendimiento que si se invirtiera el dinero.

Considérese un proyecto que requiere una asignación inicial de capital de £K y tiene un horizonte de inversión de  $H$  años (el horizonte de inversión es por lo general la vida útil del equipo). Si el proyecto genera flujos netos de efectivo  $C_1, C_2, \dots, C_H$  en los años 1, 2,  $\dots, H$ , el valor neto VN del proyecto, con una tasa de interés igual a cero es



$$-K + C_1 + C_2 + \dots + C_H \quad (11.1)$$

El valor del flujo de efectivo para el año  $N$ , con respecto al momento actual, denominado valor presente (VP), se expresa en términos de la tasa anual de intereses ( $i$ ) como

$$\frac{CN}{(1+i)^N} \quad (11.2)$$

Por lo tanto, el valor presente neto (VPN) del proyecto es

$$-K + \frac{C_1}{1+i} + \frac{C_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{C_H}{(1+i)^H} \quad (11.3)$$

Al hacer que el VPN sea igual a 0 y al resolver para determinar  $i$  se obtiene la tasa interna de rendimiento (IRR) del proyecto, la cual es el interés real obtenido durante el horizonte de inversión a partir de la inversión inicial  $K$ . En la figura 11.8 se muestra el intervalo de tasas internas de rendimiento registrado para distintas aplicaciones de robots.

### **Comparaciones basadas en el costo unitario**

Los conceptos financieros anteriores se aplicarán ahora a la selección entre distintos sistemas de manufactura. La decisión deberá basarse en una comparación de los costos unitarios para los distintos sistemas automáticos propuestos (por ejemplo, automatización fija, robots) contra los de un sistema manual existente. Un análisis completo de este problema puede encontrarse en la obra de Gustavson (1983) en la cual se basa esta sección.

El costo unitario  $C$  para la fabricación de un producto es la suma de todos los costos fijos y variables:

$$C = C_F + C_V \quad (11.4)$$

en donde  $C_F$  es el costo unitario fijo y  $C_V$  es el costo unitario variable.

El costo unitario fijo está dado por

$$C_F = P_A/Q_A \quad (11.5)$$

en donde  $P_A$  es el precio anualizado del sistema instalado y  $Q_A$  es la cantidad producida al año.

El precio anualizado del sistema instalado es el costo fijo total que se ha de cargar al sistema por cada año de su vida útil y se expresa como

$$P_A = K_f \quad (11.6)$$

en donde  $f$  es el factor de costo anual.

El costo instalado  $K$  para un sistema propuesto no se conoce durante la etapa de planeación. Con frecuencia se calcula como un múltiplo del costo del equipo, variando el factor de multiplicación de 1.0 en los sistemas manuales a 1.5 para la automatización fija y de 2.0 a 5.0 para la automatización flexible.

Si se espera que una proporción  $V$  del costo del equipo se recupere después de  $H$  años, este costo recuperable tiene un valor presente de

$$\frac{V}{(1+i)^H} K$$

El valor presente real del costo instalado es por lo tanto

$$\left[ 1 - \frac{V}{(1+i)^H} \right] K$$

Como este capital podría haberse invertido a la tasa interna de rendimiento mínima aceptable ( $i$ ) a lo largo de la duración del proyecto, cargar una fracción  $1/H$  del costo de la depreciación cada año no será suficiente; el costo deberá ponderarse para tomar en cuenta la tasa interna de rendimiento. El cargo real por depreciación anual es, por lo tanto,  $fK$  en donde el factor de costo anual  $f$  se expresa como

$$f = \left[ 1 - \frac{V}{(1+i)^H} \right] \left[ \frac{i(1+i)^H}{(1+i)^H - 1} \right] \quad (11.7)$$

El costo variable unitario se deriva de los costos de mano de obra y operativos

$$C_v = \frac{(W \times L_H) + O_H}{Q_H} \quad (11.8)$$

en donde  $W$  es el número de operadores en el sistema,  $L_H$  es el costo de la mano de obra por hora,  $O_H$  son los costos fijos por hora y  $Q_H$  es la producción por hora, la cual se relaciona con la cantidad anual producida como

$$Q_A = S \times 8D \times Q_H \quad (11.9)$$

en donde  $S$  es el número de turnos de 8 horas por día y  $D$  es el número de días hábiles al año.

Las ecuaciones (11.4), (11.5), (11.6), (11.8) y (11.9) se combinan para dar el costo unitario como

$$C = \frac{1}{Q_H} \left[ \frac{Kf}{8SD} + (W \times L_H) + O_H \right] \quad (11.10)$$

en donde  $f$  se definió en la ecuación (11.7).

La ecuación (11.10) da el costo unitario en términos de la producción para un sistema existente o propuesto y por lo general genera curvas de la forma mostrada en la figura 11.9; lo anterior permite seleccionar el sistema más económico para una tasa de producción dada. Las discontinuidades de la curva para el sistema robot ocurren cuando una celda robot se utiliza a toda su capacidad y es necesario tener otra celda para lograr incrementos adicionales en el índice de producción.

El valor de este análisis puede ilustrarse por medio de un ejemplo. En una operación existente de corte de piezas metálicas se utilizan cuatro máquinas atendidas por dos operadores que trabajan en cada uno de dos turnos, produciendo cada celda un total de 30 artículos por hora. Existen tres opciones posibles:

- (i) Mantener el sistema existente.
- (ii) Introducir un robot, de manera que la celda necesite un operador en cada turno.
- (iii) Introducir un dispositivo de selección y colocación, que requiere sólo un operador, pero que reduce la producción a dos tercios de la velocidad existente.

Las cifras para cada una de las alternativas son, respectivamente

- (i) Costo del equipo 0  
 número de operadores  $W = 4$   
 costos fijos  $O_H = 4$  libras esterlinas/h  
 costo mano de obra  $L_H = 5$  libras esterlinas/h  
 velocidad de producción  $Q_H = 30/h$
- (ii) Costo del equipo 50 000 libras esterlinas  
 número de operadores  $W = 2$   
 costos fijos  $O_H = 5$  libras esterlinas/h  
 costo mano de obra  $L_H = 5$  libras esterlinas/h  
 velocidad de producción  $Q_H = 30/h$
- (iii) Costo del equipo 20 000 libras esterlinas  
 número de operadores  $W = 3$   
 costos fijos  $O_H = 4.40$  libras esterlinas/h  
 costo mano de obra  $L_H = 5$  libras esterlinas/h  
 velocidad de producción  $Q_H = 20/h$

Se establece la práctica de trabajar turnos de ocho horas durante 250 días hábiles al año y en todos los casos el valor recuperable se considera ser del 5 % del costo de instalación después de cinco años, es decir,  $V = 0.05$ ,  $H = 5$ . La tasa interna de rendimiento mínima aceptable es 10 %, es decir,  $i = 0.1$ . El factor anual de costos es, por lo tanto, de la

ecuación (11.7),  $f = 0.256$ . Si se considera que el costo instalado  $K$  es el doble del costo del equipo, entonces la ecuación (11.10) nos da los costos unitarios:

$$(i) \quad C = \frac{1}{30} (0 + 4 \times 5 + 4) = 0.80 \text{ libras esterlinas}$$

$$(ii) \quad C = \frac{1}{30} \left\{ \frac{100\,000 \times 0.256}{8 \times 2 \times 250} + (2 \times 5) + 5 \right\} = 0.71 \text{ libras esterlinas}$$

$$(iii) \quad C = \frac{1}{20} \left\{ \frac{40\,000 \times 0.256}{8 \times 3 \times 250} + (3 \times 5) + 4.60 \right\} = 1.06 \text{ libras esterlinas}$$

Sobre una base de costos unitarios se justifica la segunda opción, la instalación de un robot.

El análisis anterior no considera las ventajas derivadas de la flexibilidad de los robots y otros equipos programables. El equipo de automatización fija puede no ser capaz de acomodar cambios en el diseño del producto, pero los sistemas flexibles pueden reprogramarse con facilidad y con frecuencia los nuevos diseños requieren sólo un mínimo cambio de herramienta.

Pueden encontrarse varios métodos para cuantificar los ahorros derivados de una mayor flexibilidad en las publicaciones especializadas (Airey y Young, 1983; Bryce, 1983; Dapiran y Manieri, 1983; Gerstenfeld y Berger, 1982; Owen, 1982b; Scott y Husband, 1983). En muchos casos es conveniente contar con la habilidad para resolver cambios regulares de diseño, por ejemplo, en líneas de soldadura por puntos para carrocerías automotrices. Y vale la pena destacar que los robots y los alimentadores de contenedores y depósitos que forman parte de los sistemas flexibles de manufactura pueden encontrar otra gran variedad de usos en la fábrica y, por lo tanto, son de gran valor para el usuario.

### 11.5 Resumen

Se ha examinado la población de robots con respecto a su crecimiento, el alcance de sus aplicaciones, su empleo por distintas industrias y su efecto sobre la industria de los robots misma. Cualquier instalación de robots debe justificarse en términos financieros y el periodo de recuperación de la inversión es un indicador de proyectos que pueden generar importantes ahorros. Al comparar sistemas manuales, dedicados y con automatización flexible, un cálculo del costo unitario que tome en cuenta el valor del dinero a través del tiempo es un método muy adecuado para evaluar su viabilidad.

# Capítulo 12

## *Factores sociales de seguridad*

---

### **12.1 Introducción**

Una vez examinados algunos de los aspectos económicos relacionados con el uso de los robots, se considerarán ahora los aspectos sociales. Una de las preocupaciones más importantes en este contexto es la seguridad dentro de la fábrica.

Aun cuando las instalaciones con robots tienen mejores estadísticas de seguridad que las instalaciones a las que han reemplazado, no por ello dejan de presentar ciertos problemas.

Las mejoras inherentes en seguridad son una característica muy deseable de los robots, como también lo es la riqueza generada a escala global como resultado de las mejoras en productividad. Sin embargo, sería poco inteligente ignorar los inquietantes cambios en los patrones de uso derivados de la automatización.

### **12.2 Aspectos de seguridad**

En comparación con otras máquinas herramienta los robots tienen un buen récord de seguridad; muchas instalaciones hacen una importante contribución a la seguridad al instalar robots para llevar a cabo trabajos que resultan peligrosos para los operadores humanos. De hecho, Japón presume de un esquema de concesiones para motivar la introducción de robots con este fin por parte de compañías pequeñas a medianas (Hasegawa y Sugimoto, 1982). Sin embargo, en esta sección nos limitaremos a analizar el problema de lograr que las instalaciones con robots resulten seguras para los operadores humanos sin importar cuál haya sido la causa para su introducción. El excelente récord de seguridad de los robots no debe distraer de la impor-

tancia de este proceso, el cual puede ponerse en práctica en forma efectiva sólo durante la etapa inicial de planificación de una instalación.

En Inglaterra no existen leyes específicas para la reglamentación de instalaciones con robots industriales, pero en una publicación de la *Machine Tools Trade Association* (Asociación de Comerciantes de Máquinas y Herramientas) (MTTA, 1982) se establecen ciertos lineamientos prácticos. La reglamentación propuesta se ha presentado a la *International Standards Organization* (Organización Internacional de Estándares), junto con propuestas de reglamentos de Japón y Alemania y se espera que en fecha próxima se defina un código internacional de seguridad para la instalación de robots.

El proceso de seguridad tiene dos etapas: determinación de los riesgos de seguridad y determinación de sistemas para solventar dichos riesgos.

### **Análisis de riesgos**

Con respecto a la seguridad, lo impredecible de las acciones de un robot establece una diferencia fundamental entre éstos y otras máquinas. Hunt (1983) cita diversos supuestos y conclusiones que los operadores han hecho en relación con el funcionamiento de los robots:

- Si el brazo no se mueve, dan por hecho que no se ha de mover.
- Si el brazo está repitiendo un patrón de acciones, suponen que seguirá repitiendo dicho patrón.
- Si el brazo se está moviendo con lentitud, suponen que continuará moviéndose lentamente.
- Si indican al brazo que debe moverse, suponen que se moverá en la forma en que ellos lo desean.

Un ejemplo del segundo supuesto ocurre en aplicaciones de soldadura en donde un robot puede llevar la punta de soldadura a una estación de limpieza después de un número determinado de ciclos de soldadura. Con respecto al tercer caso, los operadores pueden no apreciar que un robot hidráulico de gran tamaño, que por lo general se mueve a velocidades muy bajas, es capaz de realizar movimientos erráticos y violentos simplemente como consecuencia de una partícula extraña que hace que una servoválvula se quede pegada.

Los orígenes de riesgos de seguridad se han identificado (Percival, 1984) como:

- Errores de control causados por fallas dentro de los sistemas de control, errores en el *software* o interferencia eléctrica.
- Acceso no autorizado a los espacios reservados para los robots.

- Errores humanos al trabajar cerca de un robot, particularmente durante la programación, la enseñanza y el mantenimiento.
- Fallas eléctricas, hidráulicas y neumáticas.
- Riesgos mecánicos derivados de partes o herramientas transportadas por el robot o de una sobrecarga, la corrosión o la fatiga.
- Riesgos derivados de la aplicación, como los riesgos ambientales asociados con la emisión polvos, humos y radiación.

Un análisis detallado de los tipos y orígenes de los accidentes puede encontrarse en las publicaciones especializadas (Sugimoto y Kawaguchi, 1983); además de los derivados de la aplicación misma, el operador humano enfrenta dos tipos de riesgos asociados con el funcionamiento de los robots: impactos y prensiones.

Existe la posibilidad de sufrir un golpe como consecuencia de un impacto con las partes móviles del robot o con los artículos que éste transporta. Entre mayor sea su velocidad, mayor será el peligro de que existan objetos sueltos en la forma de partes que escapen de las tenaza durante un movimiento de rotación o de artículos que el robot golpee.

Resulta claro entonces que la zona de peligro de un robot no está confinada a su volumen de trabajo.

Pueden presentarse puntos de prensión dentro del volumen de trabajo. Puede ser posible que el operador quede atrapado entre los enlaces del manipulador y en todos aquellos lugares en los que cualquier parte del manipulador y su carga se aproximen a otros componentes o equipos fijos (los cuales pueden ser incluso barreras de seguridad). En este contexto, entonces, la zona de peligro es el volumen de trabajo más un espacio adicional alrededor del robot de cuando menos 1 m.

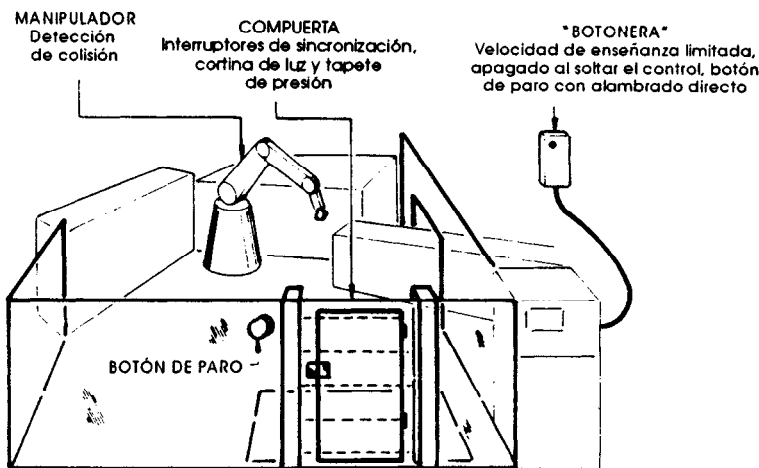
### ***Sistemas de seguridad***

Existen tres niveles de protección contra estos riesgos de seguridad:

- Sistemas para evitar que el operador se encuentre en una situación peligrosa.
- Sistemas para proteger al operador en caso de que ocurra una situación que ponga en peligro su integridad.
- Sistemas para probar y verificar el segundo nivel en forma automática.

Un sistema común se ilustra en la figura 12.1.

Las barreras de seguridad, por lo general de malla de alambre o plástico, son el medio más común para evitar que el personal ingrese a la zona de peligro pero, como se mencionó antes, estas estructuras pueden



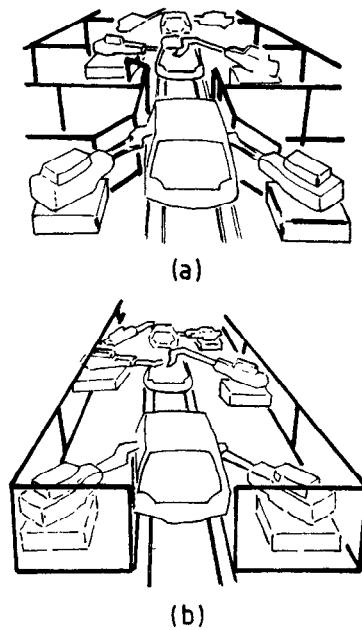
**Figura 12.1** Sistemas de seguridad en una instalación con robots.

representar un riesgo en sí mismas. Las barreras de protección deben estar fuera del volumen de trabajo del manipulador de manera que no constituyan posibles puntos prensores.

La experiencia muestra que rara vez ocurren accidentes con robots que funcionan en forma automática: la enseñanza y el mantenimiento presentan mayores riesgos. Para estas operaciones es necesario tener acceso al interior de las barreras de protección, por lo que las puertas de acceso deben estar interconectadas al sistema de control del robot para evitar que éste funcione en forma automática a toda velocidad cuando se abra una puerta. Las instalaciones con múltiples robots se pueden proteger en dos formas distintas. Cada celda robot podrá estar rodeada en forma individual y la entrada de alguna persona a dicha celda apagará ese robot en particular; en la figura 12.2(a) se ilustra un ejemplo de lo anterior. En la figura 12.2(b) se presenta toda una línea de producción protegida como una sola celda; éste es un método menos costoso en términos de barreras de protección, pero que requiere que todas las máquinas se apaguen para poder llevar a cabo actividades de enseñanza o mantenimiento en cualquiera de las máquinas de la línea.

La enseñanza por medio de una "botonera" para control manual es potencialmente más peligrosa, dado que el operador por lo general necesita estar cerca del efector final para poder ubicarlo en forma precisa con respecto a las piezas de trabajo y la máquina asociada. Tres aspectos de las "botoneras" para control manual se consideran importantes desde el punto de vista de la seguridad:





**Figura 12.2** Barreras de seguridad para robots: (a) alrededor de cada celda robot, (b) alrededor de una línea completa.

- Cuando se suelte un control suspendido, el manipulador debe detenerse.
- El botón para “paros de emergencia” deberá estar conectado en forma directa y no deberá depender del funcionamiento del *software*.
- Las velocidades de enseñanza deberán estar restringidas a valores seguros.

Un segundo nivel de seguridad es necesario para llevar a cabo acciones correctivas en caso de que el primer nivel falle o se pase por alto. Para detectar un ingreso no autorizado al área de trabajo se utilizan por lo general pisos sensores de presión, interruptores de haces luminosos o ambos; estos dispositivos están configurados para detener al robot y cualquier otra maquinaria dentro de la celda al activarse. En algunas circunstancias puede resultar apropiado incorporar dispositivos de detección en el manipulador mismo de manera que éste se detenga si toca o se acerca demasiado a otro equipo. En este caso resultan útiles los sensores de aguja eléctricos y neumáticos, los detectores de proximidad a base de rayos infrarrojos y los dispositivos ultrasónicos (véase el capítulo 8).

Se ha sugerido (Hunt, 1982) que puede lograrse un diseño libre de fallas mediante la incorporación de un tercer nivel de seguridad; este sistema debe poner a prueba el segundo nivel mediante la simulación de las condiciones por detectar. Se ha citado el ejemplo de una veleta impulsada por medio de un motor que se usa para interrumpir el haz que llega a un interruptor luminoso con el fin de probar el dispositivo y sus circuitos asociados.

### **12.3 Efectos sobre las fuentes de empleo**

La seguridad personal está afectada por las condiciones de salubridad y seguridad en el trabajo; la seguridad en el trabajo tiene ramificaciones mucho más extensas. Hace más de 80 años, H. G. Wells dijo: "Pero ahora que se han dado las nuevas condiciones de las ciencias físicas, no sólo prescinden del hombre como fuente de energía sino que además brindan la esperanza de que todo el trabajo rutinario se realice en forma automática, es cada vez más claro que en la actualidad ya no es necesario que nadie se esfuerce de manera habitual ..." (Wells, 1905). Esta visión utópica de Wells vio más allá del simple proceso de mecanización y llegó a abarcar la era de la automatización. El momento de la automatización ha llegado, pero su llegada ha engendrado un clima industrial que es aún más controvertido que utópico. ¿A qué se debe tanta controversia?

Una organización mundial con operaciones en los cinco continentes comienza a utilizar el correo electrónico; dentro de la compañía no surgen controversias ya que no se pierden trabajos dentro de la misma, pero pueden surgir ciertas repercusiones en algunas organizaciones postales. Una planta de manufactura introduce un robot para cargar y descargar dos tornos con control numérico; sólo es necesario uno de los dos operarios existentes para atender la nueva celda robot e incluso ese operario no se utilizará a toda su capacidad. Aunque lo anterior puede servir para incrementar el número de trabajos en la industria de fabricación de robots, la introducción de un robot ha sido la causa directa de la desaparición de un puesto en la fábrica. Sin embargo, en una escala global, la introducción de un robot es invariablemente "algo bueno", dado que se mejoran la eficacia y la productividad y el conflicto emana de los intereses opuestos de la administración y los empleados en el futuro inmediato. Para la administración, el beneficio inmediato es una mayor productividad, una mejor calidad, o ambas; para los empleados, el prospecto inmediato es quedarse sin trabajo. Los administradores están preocupados por el uso eficaz de la fuerza de trabajo, las materias primas, las máquinas y el capital. Los trabajadores se preocupan por sus salarios, sus horas de trabajo, la duración de sus vacaciones, su seguridad en el trabajo y su ambiente de trabajo. Dado lo anterior no es nada extraño que surjan conflictos.

Los efectos inmediatos y a largo plazo de la instalación de robots han sido y son reconocidos por ambas partes de la fuerza de relaciones laborales. El resultado es que los fabricantes de robots, los ingenieros industriales y otras personas a favor de la introducción de robots siempre remarcen a los empleados los beneficios derivados de este ejercicio: los robots se hacen cargo de trabajos sucios o peligrosos, con lo que mejoran las condiciones de trabajo de quienes operan la nueva maquinaria. Algunos llegan incluso a sugerir que los robots crean de manera directa un mayor número de trabajos que los que eliminan en las áreas de manufactura, ventas, mantenimiento y operación. Por otra parte, los sindicatos que representan a aquellos empleados desplazados en forma directa por los robots están, como es natural, preocupados por la seguridad en el trabajo y con frecuencia están forzados a adoptar la posición de "no estamos en desacuerdo totalmente con la introducción de la nueva tecnología como tal, pero ..."

Una vez bosquejado este escenario de conflictos entre las pérdidas y ganancias a corto y largo plazo, no es objetivo de los autores abundar ahora en los argumentos, dado que éstos están mucho más allá del alcance de este libro. El propósito de esta sección es señalar los efectos cuantitativos y cualitativos de la introducción de los robots sobre el empleo. Estos efectos se han dividido en efectos directos, los cuales son las consecuencias directas percibidas en un lugar de trabajo a la introducción de los robots; y efectos globales, los cuales incluyen los resultados a largo plazo del ejercicio y su efecto sobre el usuario, el aumento a corto plazo en la demanda de fabricación y atención de robots y las consecuencias globales del proceso.

### *Efectos directos*

La experiencia dice que se pierden de dos a cinco trabajos como resultado directo de la instalación de un robot (Williams, 1984; Kalmbach y colaboradores, 1982); las plazas perdidas se manifiestan en la forma de redundancias o, más usualmente, en la transferencia del operador desplazado dentro de la compañía para llenar alguna vacante que de otra forma hubiera requerido la contratación de otro empleado. Como contrapartida de esto, es posible que se hayan generado uno o dos puestos de trabajo en las industrias dedicadas a la fabricación de robots, en áreas como manufactura, ventas, mantenimiento y operación. Pero muy poco de este trabajo lo podrá adquirir la compañía del usuario.

Dada la naturaleza de los trabajos que ocupan los robots, resulta evidente que son los trabajadores no especializados y semiespecializados los más afectados por la pérdida de trabajos. La demanda de este tipo de trabajadores decrece en forma constante en comparación con otras ocupaciones.

Es muy probable que gran parte de los nuevos puestos creados por la instalación de robots se distribuya entre los empleados existentes; esto significa que aquellos que cuentan con habilidades de tipo técnico, al ser los más adecuados para una nueva capacitación, tienen mayores posibilidades de permanecer dentro de la organización; no así los trabajadores no calificados que ya no serán necesarios. Las nuevas habilidades requeridas se concentran en la electrónica y la programación; se ha demostrado que el 26 % de las compañías de Inglaterra requieren un mayor número de personal con habilidades en el campo de la microelectrónica y 11 % requieren personal con habilidades en el campo de la programación.

Se ha dicho que estos nuevos trabajos generados por los robots tienen ciertas características atractivas. Con frecuencia acarrearán una mejoría en la situación del empleado y el operador recibe además el beneficio tangible de una capacitación adicional, que puede conducir a promociones y aumentos de sueldo. Para rebatir lo anterior, se puede decir que la naturaleza de las instalaciones con robots con frecuencia requiere ciclos de trabajo más regulares que lo que era normal con las operaciones manuales; de hecho, en algunas aplicaciones, por ejemplo, inyección de metales, es muy importante para mejorar la calidad esperada de una operación automática. La regularidad del ciclo impone mayores demandas a los trabajadores que interactúan con el robot y esta "obligación de mantener el ritmo" (Kalmbach y colaboradores, 1982) puede dar por resultado trabajos más tediosos debido a la monotonía de la demanda generada por la celda robot.

### *Efectos globales*

Si se considera primero la situación global, se puede argüir que la automatización en la manufactura crea mayor riqueza al reducir los costos unitarios, lo que a su vez, redundará en un menor precio; esto crea así una mayor demanda, que debe satisfacerse por medio de una mayor producción; de este modo se reducen aun más los costos unitarios y se sigue así sucesivamente alrededor del círculo económico. Es aquí donde radica la base para la aseveración de que la automatización crea más trabajos que los que elimina. Sin embargo, también se ha dicho que la industria de la robótica en última instancia crea una mayor *actividad* que la que elimina en manufactura, pero que el número de trabajos disminuye inevitablemente (Obrzut, 1982). Por lo tanto, los beneficios derivados de la mejoría en la industria de la manufactura pasan de manera directa a la economía en forma global y no permanecen en forma específica dentro de dicha industria (Fleck, 1983).

Existen cuatro aspectos de los cambios a largo plazo en el patrón de empleo que resultan de la introducción de robots en una planta.

- (i) Las discusiones anteriores demostraron que con frecuencia las instalaciones con robots pueden justificarse en términos financieros sobre la base de los turnos de trabajo existentes, los cuales pueden estar basados en una operación en dos turnos o incluso en un sólo turno. Esto significa que la mayor demanda futura de los productos puede satisfacerse sin necesidad de incrementar el personal o la mayoría de los otros recursos, por ejemplo, edificios. Esta tendencia se identificó antes cuando se mostró que los costos unitarios para la instalación que incorpora robots se reducen conforme aumentan los índices de producción, hasta llegar al límite de capacidad máxima de la planta.
- (ii) La experiencia ha demostrado (von Gizycki, 1980) que existe un elemento autopetrante en el proceso de automatización. Conforme los robots se hacen cargo de trabajos que antes se realizaban en forma manual, los requerimientos para los trabajadores que permanecen son mayores (véase párrafo anterior). La disminución en su habilidad para cerrar la brecha de la automatización genera presiones para una mayor automatización.
- (iii) El técnico en robots surge como un nuevo elemento importante en la automatización flexible. Particularmente en el caso de los trabajos de mantenimiento, el técnico en mantenimiento requiere contar con amplios conocimientos sobre el *software* y los aspectos electrónico, eléctrico y mecánico de una instalación con robots. La razón fundamental para esto es la seguridad. Se ha visto que el mantenimiento es un aspecto peligroso de los robots, ya que con frecuencia significa poner en funcionamiento la máquina cuando el técnico está dentro de la celda. Algunas compañías como por ejemplo Citroen (Beretti, 1982) reconocen ahora el papel esencialmente multidisciplinario del técnico en robots e imponen el requisito de contar con calificaciones formales para cualquier trabajo de mantenimiento de robots.
- (iv) La mayor parte de la capacitación actual en robótica forma parte de un proceso de conversión que afecta a los trabajadores, ya que los desplaza de las antiguas habilidades substituidas por robots hacia la esfera de la operación y el mantenimiento de dichos robots. El diseño mismo de los robots es un fenómeno que cambia rápidamente y la capacitación continua para mantener al obrero al corriente de los avances más recientes es cada vez más importante. La idea de adquirir una habilidad suficiente para realizar un trabajo durante toda la vida ha sido reemplazada por un proceso de constante actualización de las habilidades propias conforme avanza la tecnología. Ciertos autores han aseverado que "una capacitación continua a intervalos de diez años llegará a considerarse como la norma para todos los empleados dentro de la industria de la manufactura" (Owen, 1982b).

Al considerar la justificación financiera de los robots, se hizo notar que son relativos todos los costos. El costo de adoptar cualquier acción debe compararse con el costo de no llevar a cabo acción alguna. El mismo principio, por supuesto, resulta aplicable a los efectos de la automatización sobre el empleo. Las pérdidas de trabajos debidas a la introducción de robots deben compararse con el efecto de no introducir dichos robots y dado que la competencia a escala internacional es inexorable, es posible que el mantener el *status quo* lleve a la consecuencia inevitable de tener que cerrar una planta de manufactura. El nivel total de empleo se afecta en última instancia por una mayor o menor demanda y "proteger el empleo a través de una lenta introducción de la robótica es, con toda seguridad, una decisión equivocada" (Gerstenfeld, 1982).

#### 12.4 Resumen

La construcción de instalaciones de robots más seguras ha sido presentado como un proceso en dos etapas: la primera es hacer un análisis de riesgos y, la segunda, la inclusión de sistemas como protección contra dichos riesgos. Los impactos y el riesgo de quedar prensado son dos de los peligros que enfrenta el operador y lo impredecible de los movimientos del robot representa un peligro más. Se han analizado sistemas de seguridad que operan a tres niveles: prevención, protección y verificación.

Se han considerado también los efectos de la introducción de la automatización. Los beneficios a largo plazo los aprovecha la economía en forma global y pueden obtenerse mejoras laborales con mayor facilidad si se presta atención a la capacitación y a la capacitación continua.

# Apéndice 1

## *Análisis de Lagrange de un robot con tres grados de libertad*

---

A continuación se presenta la deducción de la ecuación presentada en la sección 5.3. El diagrama relevante se repite como parte de este apéndice (figura A.1) por comodidad.

El método de Lagrange requiere que se calculen las energías potencial y cinética. Se considerará primero la energía cinética. Las coordenadas de las masas  $M_2$ ,  $M_{23}$ ,  $M_3$ , y  $M_{34}$  son

$$\begin{aligned}x_2 &= 0.5L_2C\theta_2C\theta_1 & x_3 &= [L_2C\theta_2 + 0.5L_3C(\theta_2 + \theta_3)]C\theta_1 \\y_2 &= 0.5L_2C\theta_2S\theta_1 & y_3 &= [L_2C\theta_2 + 0.5L_3C(\theta_2 + \theta_3)]S\theta_1 \\z_2 &= 0.5L_2S\theta_2 & z_3 &= L_2S\theta_2 + 0.5L_3S(\theta_2 + \theta_3) \\x_{23} &= L_2C\theta_2C\theta_1 & x_{34} &= [L_2C\theta_2 + L_3C(\theta_2 + \theta_3)]C\theta_1 \\y_{23} &= L_2C\theta_2S\theta_1 & y_{34} &= [L_2C\theta_2 + L_3C(\theta_2 + \theta_3)]S\theta_1 \\z_{23} &= L_2S\theta_2 & z_{34} &= L_2S\theta_2 + L_3S(\theta_2 + \theta_3)\end{aligned}$$

La derivación de estas expresiones permite calcular la velocidad de cada una de las masas. Por ejemplo, para  $M_2$

$$\begin{aligned}\dot{x}_2 &= -0.5L_2[\dot{\theta}_1S\theta_1C\theta_2 + \dot{\theta}_2C\theta_1S\theta_2] \\ \dot{y}_2 &= 0.5L_2[\dot{\theta}_1C\theta_1C\theta_2 - \dot{\theta}_2S\theta_1S\theta_2] \\ \dot{z}_2 &= 0.5L_2\dot{\theta}_2C\theta_2\end{aligned}$$

La energía cinética  $K_2$  de  $M_2$  es por lo tanto

$$\begin{aligned}K_2 &= 0.5M_2 v_2^2 = 0.5M_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 + \dot{z}_2^2) \\ K_2 &= 0.125 M_2 L_2^2 [\dot{\theta}_1^2 C^2\theta_2 + \dot{\theta}_2^2]\end{aligned}$$

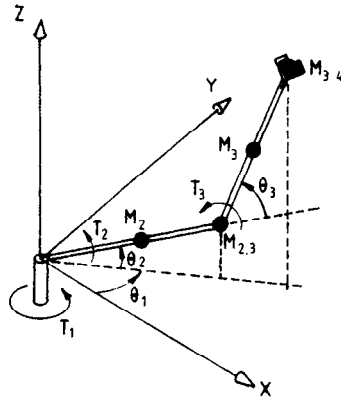


Figura A.1 Un robot con tres grados de libertad.

Si se sigue este procedimiento para cada una de las masas se obtiene una expresión para la energía cinética total  $K$ :

$$\begin{aligned}
 K = & 0.125 M_2 L_2^2 [\dot{\theta}_1^2 C^2 \theta_2 + \dot{\theta}_2^2] + 0.5 M_{23} L_2^2 [\dot{\theta}_1^2 C^2 \theta_2 + \dot{\theta}_2^2] \\
 & + 0.5 M_3 \left[ L_2^2 \dot{\theta}_1^2 C^2 \theta_2 + L_2^2 \dot{\theta}_2^2 + 0.25 L_3^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + L_2 L_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) C \theta_3 \right. \\
 & \quad \left. + L_2 L_3 \dot{\theta}_1^2 C \theta_2 C (\theta_2 + \theta_3) + 0.25 L_3^2 \dot{\theta}_1^2 C^2 (\theta_2 + \theta_3) \right] \\
 & + 0.5 M_{34} \left[ L_2^2 \dot{\theta}_1^2 C^2 \theta_2 + L_2^2 \dot{\theta}_2^2 + L_3^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + 2 L_2 L_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) C \theta_3 \right. \\
 & \quad \left. + 2 L_2 L_3 \dot{\theta}_1^2 C \theta_2 C (\theta_2 + \theta_3) + L_3^2 \dot{\theta}_1^2 C^2 (\theta_2 + \theta_3) \right]
 \end{aligned}$$

La energía potencial total  $P$  es

$$P = P_2 + P_{23} + P_3 + P_{34}$$

o bien,

$$\begin{aligned}
 P = & 0.5 M_{2g} L_2 S \theta_2 + M_{23g} L_2 S \theta_2 + M_{3g} [L_2 S \theta_2 + 0.5 L_3 S (\theta_2 + \theta_3)] \\
 & + M_{34g} [L_2 S \theta_2 + L_3 S (\theta_2 + \theta_3)]
 \end{aligned}$$

El lagrangiano  $L$  se define como

$$L = K - P$$

Las fuerzas de rotación  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$  se pueden calcular a partir de

$$T_n = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_n} - \frac{\partial L}{\partial \theta_n}$$



# Apéndice 2

## *Análisis del robot de eslabones paralelos*

---

El robot de eslabones paralelos de la sección 5.3 se ilustró en la figura 5.7. Dicha figura se repite en este apéndice como figura A.2(i) por comodidad. En la figura A.2(ii) se muestran diversas proyecciones de la placa de las tenazas del robot en un plano de coordenadas  $x^*y^*z^*$ , paralelo al plano de coordenadas reales  $xyz$  y con origen en el punto 1 del plano. El punto 1 tiene las coordenadas  $(x_1y_1z_1)$  en el plano  $xyz$ .

Las coordenadas del punto 2 son las mas fáciles de determinar. En la figura A.2(ii)(c) se dan las coordenadas  $x^*$  e  $y^*$  y en la figura A.2(ii)(b) la coordenada  $z^*$  del punto 2.

$$x_2^* = m \cos \xi \cos \varepsilon$$

$$y_2^* = m \cos \xi \sin \varepsilon$$

$$z_2^* = m \sin \xi$$

en donde  $m$  es la distancia entre los puntos 1 y 2 en el plano.

Si se pasa al punto 4, al usar la figura A.2(ii)(c) se puede escribir

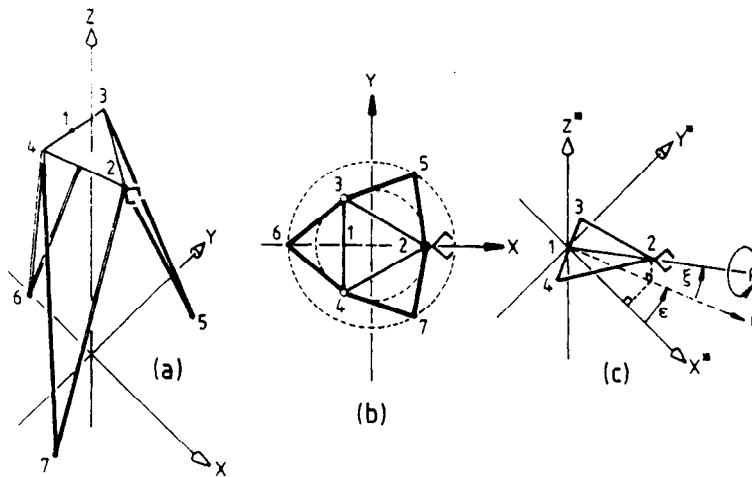
$$x_4^* = n [\cos p \sin \varepsilon + \sin p \sin \xi \cos \varepsilon]$$

$$y_4^* = n [\sin p \sin \xi \sin \varepsilon - \cos p \cos \varepsilon]$$

y de la figura A.2(ii)(b)

$$z_4^* = -n \sin p \cos \xi$$

en donde  $n$  es la distancia del punto 1 al punto 4, es decir, la mitad de la longitud de un lado.



**Figura A.2(i)** Un robot con topología paralela: (a) distribución general, (b) vista de planta de la posición de referencia, (c) coordenadas de rotación.

Las coordenadas del punto 3 se obtienen por simetría:

$$x_3^* = -n [\cos p \sin \epsilon + \sin p \sin \xi \cos \epsilon]$$

$$y_3^* = n [\cos p \cos \epsilon - \sin p \sin \xi \sin \epsilon]$$

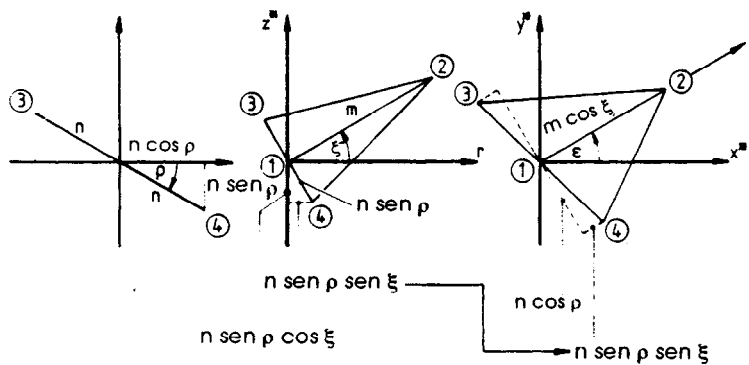
$$z_3^* = n \sin p \cos \xi$$

(a)

(b)

(c)

Vista a lo largo del eje de rotación 1 2 desde 1    Proyección en el plano  $rz^*$     Proyección en el plano  $x^*y^*$



**Figura A.2(ii)** Proyección de la placa de las tenazas del robot sobre el plano de coordenadas  $x^*y^*z^*$ : (a) vista sobre el eje de rotación 1 2 desde 1, (b) proyección sobre el plano  $rz^*$ , (c) proyección sobre el plano  $x^*y^*$ .

Pueden obtenerse los mismos resultados al utilizar transformaciones de matriz (capítulo 2). Un análisis más detallado de la figura A.2(i)(c) permite apreciar que es posible llegar a la configuración ilustrada a través de una secuencia de rotaciones sobre los ejes  $X^*$ ,  $Y^*$  y  $Z^*$ . Primero se realiza una rotación  $p$  en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj sobre el eje  $X^*$ , seguida por una rotación  $\xi$  en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj sobre el eje  $Y^*$ , y, por último, una rotación  $\varepsilon$  en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj sobre el eje  $Z^*$ . La transformación total se encuentra al multiplicar las tres transformaciones de rotación.

$$\begin{bmatrix} C\varepsilon & -S\varepsilon & 0 & 0 \\ S\varepsilon & C\varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\xi & 0 & -S\xi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ S\xi & 0 & C\xi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Cp & -Sp & 0 \\ 0 & Sp & Cp & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} A & B & C & 0 \\ D & E & F & 0 \\ G & H & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

en donde

$$\begin{aligned} A &= C\xi C\varepsilon & B &= -(CpS\varepsilon + SpS\xi C\varepsilon) \\ C &= SpS\varepsilon - Cp\xi C\varepsilon & D &= C\xi S\varepsilon \\ E &= CpC\varepsilon - SpS\xi S\varepsilon & F &= -(SpC\varepsilon + CpS\xi S\varepsilon) \\ G &= S\xi & H &= SpC\xi & I &= CpC\xi \end{aligned}$$



## Bibliografía

---

- Abele, E. (1981) Adaptive controls for fettling of castings with an industrial robot, *Proc. 1st Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Airey, J. and Young, C. (1983) Economic justification-counting the strategic benefits, *Proc. 2nd Internat. Conf. Flexible Manufacturing Systems*.
- Akeel, H. A. (1982) Expanding the capabilities of spray painting robots. *Robotics Today*, April, pp. 50-53.
- Albus, J. S. (1981) *Brains, Behaviour and Robotics*, McGraw-Hill.
- Albus, J. S., McLean, C. R., Barbera, A. J. and Fitzgerald, M. L. (1983) Hierarchical control for robots in an automated factory, *Proc. 13th. Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Aleksander, I. (1983) *Artificial Vision for Robots*, Kogan Page.
- Aleksander, I. and Burnett, P. (1983) *Reinventing Man*, Kogan Page.
- Allan, R. (1983) Tactile sensing, 3-D vision, and more precise arm movements herald the hardware trends in industrial robots, *Electronic Design*, 12 May, pp. 99-112.
- Ambler, A. P., Popplestone, R. J. and Kempf, K. G. (1982) An experiment in the off-line programming of robots, *Proc. 12th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Arzbaecher, R. C. (1960) Servomechanisms with force feedback. ANL 6157.
- Asada, H., Kanade, T. and Takeyama, I. (1983) A direct-drive manipulator: Development of a high-speed manipulator, in *Developments in Robotics*, IFS Publications. (1983).
- Automatix (1982) RAIL Software Reference Manual (ROBOVISION and CYBERVISION). Rev. 3.0, MN-RB-07, Automatix Inc.
- Baker, J. M. (1981) How to achieve recognition, *Speech Technology*, Fall, pp. 30-43.
- Barrow, H. G. (1980) Artificial Intelligence, Infotech State of the Art Report Series 8, No. 6, Factory Automation, Infotech Ltd.

- Baruh, I. S., Konstantinov, M. M., Delov, J. P. and Patarinski, S. P. (1980) Microprocessor based algorithms for control of industrial robots, *Proc. Control Problems and Devices in Manufacturing Technology*, IFAC.
- Bauzil, G., Briot, M. and Ribes, R. (1981) A navigation sub-system using ultrasonic sensors for the mobile robot Hilare, *Proc. 1st Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Control*.
- Bejczy, A. K. (1974) Robot arm dynamics and control, Technical Memo 33-669, Jet Propulsion Laboratory.
- Bejczy, A. K. (1980) Sensors, controls and man-machine interface for advanced tele-operation, *Science* 208, No. 4450, pp. 1327-1335.
- Belforte, G., D'alfion, N., Quagliotti, F. and Romiti, A., (1981) Identification through air jet sensing. *Proc. 1st Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Beretti, A. (1982) Robotics: a new career opportunity for technicians in industry, *Proc. 12th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Bessonov, A. P. and Umnov, N. W. (1976) Choice of geometric parameters of walking machines, *Proc. 2nd Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators*.
- Bessonov, A. P. and Umnov, N. V. (1983) The stabilization of the position of the body of walking machines, *Mech. Mach. Theory* 18, No. 4, pp. 261-265.
- Boucharlat, G., Chabbal, J. and Chautemps, J., (1984) 256 x 256 pixel CCD solid state image sensor *Proc. 4th Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- BRA (1984) 1984/85 UK Robots Industry Directory, British Robot Association.
- BRA (1985) *Robot Facts 1984* British Robot Association.
- Braggins, D. (1984) Giving robots sense. *Automation* November, pp. 32-31.
- Bryce, A. L. G. (1983) Is there such a thing as low-cost FMS? *Proc. 2nd Internat. Conf. Flexible Manufacturing Systems*.
- Burnett, J. R. (1957) Force reflecting servos add feel to remote controls. *Control Engng* 4, 82-87.
- Busby, R. F. (1976) Manned Submersibles. Office of the Oceanographer of the Navy (USA).
- C & I (1986) Various articles on programmable controllers, *Control and Instrumentation* Vol. 18, No. 1, January, 39-71.
- CAD/CAM (1982) *CAD/CAM: Your Questions Answered* The CAD/CAM Association.
- CAD/CAM (1983) *A Guide to CAD/CAM* Institution of Production Engineers/The Numerical Engineering Society.
- Campbell, N. A., Reid, I. M. and McClean, J. H. (1984) Short's robot ultrasonic scanning system, in *UK Robotics Research 1984* MEP.
- Carlisle, B., Roth, S., Gleason, J. and McGhie, D. (1981) The PVMA TM/VS-100 robot vision system, *Proc. 1st Internat. Conf. Robot Vision and Sensor Controls*.
- Carter, C. F. (1972) Trends in machine tool development and application, *Proc. 2nd Internat. Conf. Product Development and Manufacturing Technology*.
- Charles, J. and Vertut, J. (1977) Cable controlled deep submergence tele-operator system, *Mech. Mach. Theory* 12, pp. 481-492.
- Chechinski, S. S. and Agrawal, A. K. (1983) Magnetolastic tactile sensor, *Proc. 3rd Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Chen, Fan Yu (1982) Gripping mechanisms for industrial robots, *Mech. Mach. Theory* 17 No. 5, pp. 299-311.

- Childress, D. S. (1973) Powered limb prostheses—their clinical significance, *IEEE Trans. Biomed. Engng* 20, No. 3, pp. 200-207.
- Cincinnati (1980a) Operating Manual—T3 Industrial Robot, Version 3.0. Publication No.1-IR-79149, Cincinnati Milacron.
- Cincinnati (1980b) Basic Documentation Acramatic Robot Control (RC) V3 Hardware, Publication No. 7-000-0393AA, Vols 1-3, Cincinnati Milacron.
- Clowes, M. B. (1971) On seeing things, *Artificial Intelligence* 1.
- Coiffet, P. (1983a) *Robot Technology Vol. 1: Modelling and Control*. Kogan Page.
- Coiffet, P. (1983b) *Interaction with the Environment* Kogan Page.
- Colson, J. C. and Perreira, N. D. (1983) Kinematic arrangements used in industrial robots, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Cook, G. E. (1983) Position sensing with an electric arc, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial*
- Corell, R. W. and Wijnschenk, M. J. (1964) Design and development of the Case Research Arm-Aid, Case Institute of Technology Report EDC 4-64-4
- Crossley, T. R. and Lo, E. K. K. (1981) Key lecture on robotics, 2nd Special Convention on Information Technologies, Productivity and Employment.
- Cugy (1984) *Industrial Robot Specifications*, Kogan Page.
- Dapiran, A. and Manieri, M. (1983) The cost of flexibility in the FMS, *Proc. 2nd Internat. Conf. Flexible Manufacturing Systems*.
- Dario, P., Domenici, C., Bardelli, R., De Rossi, D. and Pinotti, P. C. (1983) Piezoelectric polymers: new sensor materials for robotic applications, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Datta, I. and Kuo, C. (1978) The role of manipulators for underwater activities offshore, *Proc. 3rd Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators*.
- Davies, E. R. (1984a) Design of cost-effective systems for the inspection of certain food products during manufacture, *Proc. 4th Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Davies, E. R. (1984b) A glance at image analysis, *Chartered Merch Engnr* Vol. 31, No. 12, pp. 32-35.
- Denavit, J. and Hartenberg, R. S. (1955) A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices, *ASME J. Appl. Math.* Vol. 77 pp. 215-221.
- Dillman, R. (1982) A sensor controlled gripper with tactile and non-tactile sensor environment, *Proc. 2nd Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Control*.
- Doebelin, E. O. (1983) *Measurement Systems: Application and design* McGra-Hill.
- Donato, G. and Camera, A. (1981) *A High Level Programming Language for a New Multi-arm Robot Assembly* DEA.
- During, J. and van Miltenburg, T. C. M. (1967) A emg operated control system for a prosthesis, *Med. Biol. Engng* 5 no. 6, pp. 597-601.
- ECC (1972) *DC Motors: Speed Controls Servo Systems* Electrocraft Corporation. Pergamon.
- Edling, G. and Porsander, T. (1984) Adaptive control of torch position and welding parameters in robotic arc welding—examples and practical use, *Proc. 4th Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Edson, D. (1984) Bin picking robots punch in, *High technology* June, pp. 57-60.

- Engleberger, J. F. (1980) *Robotics in Practice* Kogan Page.
- Erdelyi, F., Nemes, L. and Orban, P. (1980) Path calculation and sampled data control systems for multi-axis machines, *Proc. Control Problems and Devices in Manufacturing Industry Conf. IFAC*.
- Espiau, and Catros, J. Y. (1980) Use of optical reflectance sensors in robotics applications, *IEEE Trans. Syst. Man Cybernet. Vol. St,C-10*, No. 12, December, pp. 901-912.
- Evard, F., Farreny, H. and Prade, H. (1982) A pragmatic interpreter of a task-oriented subset of natural language for robotic purposes, *Proc. 12th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Fleck, J. (1983) The adoption of robots. *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Fletcher, M. J. and Leonard, F. (1955) The principles of artificial hand design. *Artificial Limbs 2*.
- Fountain, T. (1983) Image processing by parallel computer, *Automation*, September, pp. 8-15.
- Fryer, R. J. (1984) Archie—an experimental 3D vision system. *Proc. 4th Internat. Symp. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Fujiwara, K., Kawashima, Y., Kato, H. and Watanabe, H. (1977) Development of guideless robot vehicle, *Proc. 7th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Gaillet, A. and Reboulet, C. (1983) An isostatic six component force and torque sensor, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Gandy, T. G. (1983) A simple robot system for loading/unloading internal grinders, *Proc. 1eth Internat. Symp. Industrial Robots*.
- GEC (1968) Ilardiman prototype project, Report S-68-1060, General Electric Co.
- Gerstenfeld, A. and Berger, P. (1982) A model for economic and social evaluation of industrial robots, *Proc. 12th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Goertz, R. C. (1952) Fundamentals of general purpose remote manipulators, *Nucleonics 10*.
- Goertz, R. C. (1964) Some work on manipulator systems at ANL: past, Present and a look at the future, *Proc. 1964 Seminars Remotely operated Special Equipment Vol. 1 ALC Conf.* 640508.
- Goertz, R. C., Burnett, J. R. and Bevilacqua, F. (1953) Servos for remote manipulation, AEC ANL-5022.
- Gough, V. E. and Whitehall, S. G. (1962) Universal tyre test machine. *Proc. 9th Internat. Conf. FISITS*, Insitute of Mechanical Engineers.
- Gruver, W. A., Soroka B. I., Craig, J. J. and Turner, T. L. (1983) Evaluation of commercially available robot programming languages, *Proc. 13th Internat. Symp Industrial Robots*.
- Guitte, J., Kwee, H. H., Ouetin, N. and Yelon, J. (1979) The Spartacus telethesis manipulator control studies, *Bull Prosth. Res.* BPR 10-32, Fall, pp. 69-105.
- Gunn, T. G. (1982) The mehanization of design and manufacturing, *Scientific American*, September.
- Gustavson, R. E. (1983) Choosing manufacturing systems based on unit cost, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Guzman, A. (1968) Computer recognition of three dimensional objects in a scene, MIT Report MAC-TR-59.



- Hareland, A. (1983) No novice in surface coating, in *Decade of Robotics*. IFS (1983).
- Harmon, L. D. (1982) Automated tactile sensing *Int. J. Robotics Res.* 1 No. 2, Summer, pp. 3-32.
- Harris, D. M. J. and Irvine, D. A. (1984) Robot sensory systems, *Proc. 1st Conf. Irish Manufacturing Committee: Manufacturing Technology: Research and Development*, Parsons Press.
- Hartley J. (1983) *Robots at Work* IFS Publications.
- Hartley J. (1984) Semi-direct drive to the fore. *The Industrial Robot*, September, pp. 158-161.
- Hasegawa, Y. (1979) New developments in industrial robots. *Int. J. Production Res.* August.
- Hasegawa, Y. and Sugimoto, N. (1982) Industrial safety and robots, *Proc. 12th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Haynes, L. S., Barbera, A. J., Albus, J. S., Fitzgerald, M. L. and McCain, H. (1984) An application example of the NBS robot control system, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 1 No. 1, pp. 81-95.
- Heathkit (1980) *Industrial Robots and Electronics*. Heathkit Educational Systems.
- Hirose, S. and Umetani, Y. (1977) The development of soft gripper for the versatile robot hand, *Proc. 7th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Hirose, S. and Umetani, Y. (1978) Some considerations on a feasible walking mechanism as a terrain vehicle. *Proc. 3rd Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators*.
- Hirose, S. and Umetani, Y. (1981) A cartesian co-ordinates manipulator with articulated structure. *Proc. 11th Internat. Conf. Industrial Robots*.
- Hnatek, E. R. (1976) *A User's Handbook of D/A and A/D Converters*, Wiley.
- Hohn, R. E. (1978) Computed path control for an industrial robot, *Proc. 8th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Holland, S. W., Rossol, L. and Ward, M. R. (1979) Consight-1: a vision-controlled robot system for transferring parts from belt conveyors. in *Computer Vision and Sensor Based Robots*, Plenum Press.
- Horner, G. R. and Lacey, R. J. (1983) High performance brushless PM motors for robotics and actuator applications, *Proc. 1st European Conf. on Electrical Drives/Motors/ Controls* S2, PLL Conference Publications No. 19.
- Hotta, H., Ohtsuka, K. and Natori, K. (1977) Underwater bilateral servo manipulator, *Proc. Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Houldcroft, P. T. (1979) *Welding Process Technology*, Cambridge University Press.
- Hrones, J. A. and Nelson, G. L. (1951) *Analysis of the Four-Bar Linkage*, MIT Press.
- Huffman, D. A. (1971) Impossible objects as nonsense sentences. in *Machine Intelligence 6*, Edinburgh University Press.
- Hunt, K. H. (1978) *Kinematic Geometry of Mechanisms*, Clarendon Press.
- Hunt, K. H. (1982) Geometry of robotic devices, *Inst. Engrs Aust., Mech. Engng Trans.*, pp 213-220.
- Hunt, V. D. (1983) *Industrial Robotics Handbook*, Industrial Press.
- Hutchinson, A. C. (1967) Machines can walk, *Chartered Mech. Engr.*, November, pp. 480-484.
- IBM (1981) *AML Reference Manual* 2nd edn, IBM.

- IFS (1983) *Decade of Robotics* IFS Publications.
- Jacobsen, S. C., Knutti, D. F., Johnson, R. T. and Sears, H. H. (1982) Development of the Utah artificial arm, *IEEE Trans. Biomed. Engng* 4 Vol. Br-IE-29, No. 4. April, pp. 249-269.
- Johnsen, E. G. and Corliss, W. R. (1969) *Human Factors Applications in Tele-operator Design and Information*, Wiley-Interscience.
- Johnsson, U., Almström, C., Körner, L., Herberts, P. and Kedefors, R. (1981) A microprocessor based system for control of multifunctional myoelectric hands. *Proc. 7th Internat. Conf. External Control of Human Extremities*.
- Jones, B. M. and Saraga, P. (1981) The application of parallel projections to three dimensional object location in industrial assembly, *Pattern Recognition* 14.
- Kafrissen, E. and Stephans, M. (1984) *Industrial Robots and Robotics*, Reston/Pren-tice Hall.
- Kalmbach, P., Kasiske, R., Manske, F., Mickler, O., Pelull, W. and Wobbe-Ohlenburg, W. (1982) Robots effect on production, work and employment. *The Industrial Robot*, March, pp. 42-45.
- Kasai, M., Takeyasu, K., Uno, M. and Muraoka, K. (1981) Trainable assembly system with an active sensory table possessing six axes, *Proc. 11th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Kato, I. (1977) *Mechanical Hands*, Tokyo.
- Kauffman, H. (1983) ASEA's secondary current development transmission system for pot welding systems, in *Developments in Robotics*, IFS Publications.
- Kay, J. (1983) Proximity switches, *Electrical Equipment*,
- Kelley, C. R. (1968) *Manual and Automatic Control*, Wiley.
- Konstantinov, M. S. (1975) Mechanical grippers, *Proc. 5th. Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Kremers, J., Blahnik, C., Brain, A., Cain, R., DeCurtins, J., Meseguer, J. and Peppers, N. (1983) Development of a machine-vision-based robotic arc welding system, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Kretch, S. J. (1982) Robotic animation, *Mech. Engng*, August, pp. 32-3.
- Kuwahara, Y. (1982) The Japanese way of robot life, *Employment Gazette*, August, pp. 346-350.
- Lanton, S. and Sakasai, B. (1983) Low cost absolute precision data for robots, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Larcombe, M. H. E. (1981) Carbon fibre tactile sensors. *Proc. 1st Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Control*.
- Lee, C. S. G. (1982) Robot arm kinematics, dynamics and control, *Computer*, December.
- Lee, C. S. G. and Ziegler, M. (1983) A geometric approach in solving the inverse kinematics of PUMA, robots, *Proc. 13th Symp. Industrial Robots*.
- Lefer, H. (1970) Electrohydraulic servos control walking machines, *Hydraulics and Pneumatics*, August, pp. 63-65.
- Levas, A. and Selfridge, M. (1983) Voice communications with robots, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Lewis, A., Nagpal, B. I. C. and Watts, P. L. (1983) Investment analysis for robotic applications, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.

- Lewis, R. A. and Johnson A. R. (1977) A scanning laser range finder for a robot vehicle, *Proc. 5th Internat. Joint Conf. Artificial Intelligence*.
- Lian, D., Peterson, S. and Donath, M. (1983) A three-fingered, articulated. robotic hand, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Lieberman, L. I. and Wesley, M. A. (1977) AUTOPASS: An automatic programming system for computer controlled mechanical assembly, *Int. J. Res. Devel.* 21, Pt. 4, pp. 321-323.
- Lhote, F., Kauffmann, J. M., Andre, P. and Taillard, J. P. (1984) *Robots Componets and Systems*, Kogan Page.
- Luh, J. Y. S., Walker, M. W. and Paul, R. P. C. (1979) Neuton-Euler formulation of manipulator dynamics for computer control, *Information and Control Problems in Manufacturing Technology Conference*, IFAC.
- Luh, J. Y. S., Walker, M. W. and Paul, R. P. C. (1980a) On-line computational scheme for mechanical manipulators. *J. Dnamic Sist. Meas. Control* 102, No. 2, June, pp. 69-76.
- Luh, J. Y. S., Walker, M. W. and Paul, R. P. C. (1980b) Resolved acceleration control of mechanical manipulators, *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 25. No. 2 June, pp. 468-474.
- Lundstrom, G. (1976) A new method of designing grippers, *Proc. 6th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Lundstrom, G., Glemme, B. and Rooks. B. W. (1977) *Industrial Robots—Gripper Review*, IFS Publications.
- Luo, R. C., Suresh, S. and Grande. D. (1983) Sensors for cleaning castings with robot and plasma arc. *Proc. 3rd Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Makino, H. and Furuya. Y. (1982) SCARA robot and its family, *Proc. 3rd Conf. on Asseembly Automation*.
- Margrain, P. (1983) Seno-actuators and robotics. in *Developments in Robotics*, IFS Publications.
- Martins, G., Nordstrom, R. and Svensson. M. (1983) Machining cells put robots in their right place, in *Decade of Robotics*, IFS (19R3).
- Masuda, R. and Hasegawa, K. (1981) Total sensory system for robot control and its design approach, *Proc. 12th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- McCloy, D. (1984) *Technology Made Simple*, Heinemann.
- McCloy, D. and Martin, H. R. (1980) *The Control of Fluid Power*, Ellis Horwood.
- McCormack, W. and Godding. E. G. (1983) The creeping technology of grinding and tettling, in *Decade of Robotics*, IFS (1983).
- McGhee, R. B. (1968) Some finite state aspects of legged locomotion, *Math. Biosci.* 2, pp. 67-84.
- McGhee, R. B., Chao, C. S., Jasa. V. C. and Orin, D. E. (1978) Real time computer control of a hexapod vehicle, *Proc. 3rd Internat. Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators*.
- McGhee, R. B. and Frank, A. A. (1968) On the stability properties of quadruped creeping gaits, *Math. Biosci.* 3, pp. 331-351.
- McGhee, R. B. and Isswandhi, G. I. (1979) Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain, *IEEE Trans. Syst. Man Cybernet.* 9, Vol. SMC-9. No. 4, April, pp. 176-182.

- McGhee, R. B. and Jain, A. K. (1972) Some properties of regularly realizable gait matrices, *Math. Biosci.* 13, pp. 179-193.
- McGovern, D. E. (1977) An investigation of superiority control of remote manipulation, *Mech. Mach. Theory* 12, pp. 3-9.
- Megahed, S. and Renaud, M. (1982) Minimization of the computation time necessary for the dynamic control of robot manipulators, *Proc. 12th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Menadier, C. *et al.* (1967) The Fotonic Sensor. *Instrument and Control Systems*, Mechanical Technology Inc., Latham, N.Y.
- Milenkovic, V. (1979) Computer synthesis of continuous path robot motion, *Proc. 5th World Congr. Theory of Machines and Mechanisms*.
- Milenkovic, V. and Huang, B. (1983) Kinematics of major robot linkages, *Proc. 13th Conf. Industrial Robots*.
- Mizutame, M., Sugiyama, S., Takaishi, K., Tomioka, K. and Sakurai T. (1984) Development of robot-press production system, *Proc. 24th Internat. Machine Tool Design and Research Conf.*
- Money, S. A. (1982) *Microprocessor Data Book*, Granada.
- Morgan, C. G., Bromley, J. S. E., Davey, P. G. and Vidler, A. R. (1983) Visual guidance techniques for robot arc welding, *Proc. 3rd Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Morganite (1961) *Carbon Brushes and Electrical Machines*, Morganite Carbon Ltd.
- Mosher, R. S. (1967) Handyman to Hardiman, SAE Paper 670088.
- Mosher, R. S. and Wendel, B. (1960) Force reflecting electrohydraulic servomanipulator, *Electrotechnology* 66, 138/141.
- Mott, D. H., Lee, M. H. and Nicholls, H. R. (1984) An experimental very high resolution tactile sensor array, *Proc. 4th Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- MTTA (1982) *Safeguarding Industrial Robots Part I—Basic Principles*, The Machine Tool Trades Association.
- Mujtaba S. M. (1980) Current status of the AL manipulator programming system, *Proc. 10th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Mujtaba, S. M. and Goldman, R. (1979) The AL User's Manual, STAN-CS-79-719. Stanford University.
- Nally, G. M. (1983) Robotic arc welding: at what state is the art? *Robotics Today*.
- Napier, J. (1967) The antiquity of human walking, *Sci. Am.* 216, No. 4, April. pp. 56-66.
- Nathan, C. A. and Flatau, C. R. (1978) Manipulators for large scale construction in outer space, *Proc. 26th Conf. Remote Systems Technology*.
- Neubauer, G. (1982) Pneumatic grippers for a vise-like grip or a gentle squeeze. *Machine Design*, November 25, pp. 69-71.
- Nevatia, R. (1982) *Machine Perception*, Prentice Hall.
- Nevins, J. *et al.* (1974) A scientific approach to the design of computer controlled manipulators, Report R 837, Charles Stark Draper Laboratory, MIT.
- Nevins, J. L. and Whitney, D. E. (1977) Information and control issues of adaptable programmable assembly systems for manufacturing and tele-operator applications. *Mech. Mach. Theory* 12, pp. 27-43.

- Nimrod, N., Margalith, A. and Mergler, H. W. (1982) A laser-based scanning range finder for robotic applications, *Proc. 2nd Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Nitzan, D., Brain, A. E. and Duda, R. O. (1977) The measurement and use of reistered reflectance and range data in scene analysis, *Proc. IEEE* 65, No. 2. February. pp. 206-220.
- Northcott, J. and Rogers, P. (1981) *Microelectronics in British Industry: The Pattern of Change*, No. 625, Policy Studies Institute.
- Obrzut, J. J. (1982) Robotics extends a helping hand, *Iron Age*, 19 March. pp. 60-83.
- Ogo, K., Ganse, A. and Kato, I. (1978) Quasi dynamic walking of biped walking machine aimed at completion of steady walking, *Proc. 3rd Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators*.
- Okada, T. and Tsuchiya, S. (1977) On a versatile finger system, *Proc. 7th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Onega, G. T. and Clingman, J. H. (1972) Free flying tele-operator requirements and conceptual design, *Proc. 1st Nat. Conf. Remotely Manned Systems*.
- Owen, A. E. (1982a) Automated assembly can equate with short payback periods. *Proc. 3rd Internat. Conf. Assembly Automation*.
- Owen, A. E. (1982b) *Chips in Industry*, Special Report No. 13. The Economist Intelligence Unit.
- PERA (1982) Vision Systems, PERA Report 366, Production Engineering Research Association.
- Park, W. T. (1981) *The SRI Robot Programming System (RPS)—An Executive Summary*, SRI International.
- Patla, A. E., Hudgins, B. S., Parker, P. A. and Scott, R. N. (1982) Mioelectric signal as a cuantitative measure of muscle mechanical output, *Med. Biol. Engng Comput.* 20, May pp. 319-328.
- Patzelt, W. (1982) A robot position control algorithm for the grip onto an accelerated conveyor or belt, *Proc. 12th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Paul, R. P. (1982) *Robot Manipulators: Mathematics Programming and Control*, MIT Press.
- Paul, R. P., Shimano, B. and Mayer, G. E. (1981) Kinematic control equations for simple manipulators, *IEE Trans. Syst. Man Cybernet.* 11, No. 6, June.
- Pavone, V. J. (1983) User friendly welding robots, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Peizer, E. *et al.* (1969) The Otto Bock hand. *Bull. Prosth. Res.*
- Percival, N. (1984) Safety aspects of industrial robots, *Metal Construction*, April. pp. 201-203.
- Pham, D. T. (1983) A low cost industrial robot, in *Development in Robotics*, IFS Publications.
- Polaroid (1980) Polaroid Ultrasonic Ranging Experimenter's Kit, Polaroid Corporation.
- Popplestone, R. J. *et al.* (1978) RAPT: A language for describing assemblies, in *Coll. On Robotics*, National Engineering Laboratory.

- Potkonjak, V., Vukobratovic, M. and Hristic, D. (1983) Interactive procedure for computer-aided design of industrial robot mechanisms, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Presern, S., Spegel, M. and Dzinek, I. (1981) Tactile sensing with sensory feedback control for industrial are welding robots. *Proc. 1st Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Pugh, A. (1983) Second generation robotics and robot vision, Chapter 1 of *Robotic Technology*. Short Run Press.
- Purbrick, J. A. (1981) A force transducer employing conductive silicone rubber. *Proc. 1st Internat. Conf. Robot. Vision and Sensory Controls*.
- Raibert, M. H. and Sutherland, I. E. (1983) Machines that walk, *Sci. Am.*, January, pp. 32-41.
- Raibert, M. H. and Tanner, J. E. (1982) A VLSI tactile array sensor, *Proc. 12th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Ranky, P. G. (1983) *The Design and Operation of FMS*, IFS Publications.
- Ray, J. (1983) Let the application choose the drive, in *Decade of Robotics*, IFS (1983).
- Rebman, J. and Morris, K. A. (1983) A tactile sensor with electrooptical transduction, *Proc. 3rd Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Reed, C. K. (1979) Two hands are better than one. *Proc. 9th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Roberts, L. G. (1963) Machine perception of three-dimensional solids, in *Optical and Electro-optical Information Processing*, MIT Press.
- Robertson, B. E. and Walkden, A. J. (1983) Tactile sensor system for robotics, *Proc. 3rd Internat. Symp. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Rosen, C. A. (1979) Machine vision and robotics: industrial requirements. in *Computer Vision and Sensor Based Robots*, Plenum Press.
- Ross, M. H. (1981) Automated manufacturing—why is it taking so long? *Long Range Planning* 14 No. 3, pp. 28-35.
- Rovetta, A., Vicentini, P. and Franchetti, I. (1981) On development and realization of a multipurpose grasping system. *Proc 1th Internat. Conf. Industrial Robots*.
- Ruder, H. (1982) A modern assembly robot. *Proc. 3rd Internat. Conf. Assembly Automation*.
- Schmalenbach, E., Küppers, H. J. and Roesler, H. (1978) Manipulators for severely handicapped: control philosophy and applications, *Proc. 3rd Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators*.
- Schmidl, H. (1977) The I.N.A.I.L. experience fitting upper limb dysmelia patients with myoelectric control, *bull. Prosth. Res.*, Spring, pp. 17-42.
- Scott, P. B. and Husband, T.M. (1983) Robotic assembly: Design, analysis and economic evaluation, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Shirai, Y. (1972) Recognition of polyhedra with a range finder, *Pattern Recognition* 4.
- Sigma (1980) *Sigma Programming Handbook*, Olivetti SpA.
- Skinner, F. (1975) Designin a multiple prehension manipulator, *Mech. Engng*, September, pp. 30-37.

- Stackhouse, T. (1979) A new concept in robot wrist flexibility, *Proc. 9th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Stauffer, R. N. (1983a) Progress in tactile sensor development. *Robotics Today*, June, pp. 43-49.
- Stauffer, R. N. (1983b) Robots provide efficiency and quality in New production welding lines at Jeep, *Manufacturing Engng*, October, pp. 57-60.
- Stewart, D. (1965) A platform with six degrees of freedom, *Proc. Inst. Mech. Engrs* 180, Pt. 1, No. 15, pp. 371-386.
- Sugimoto, N. and Kawaguchi, K. (1983) Fault tree analysis of hazards created by robots. *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Swain, I. D. (1982) Adaptive Control of an Arm Prosthesis, Ph.D. Thesis, University of Southampton.
- Swain, I. D. and Nightingale, J. M. (1981) Microprocessor control of a multifunctional arm and hand prosthesis, *Proc. 7th Internat. Conf. External Control of Human Extremities*.
- Sword, A. J. and Park, W. T. (1977) Location and acquisition of objects in unpredictable locations, *Mech. Mach. Theory* 12 pp. 123-132.
- Taguchi, K., Ikeda, K. and Matsumoto, S. (1976) Four-legged walking machine, *Proc. 2nd Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators*.
- Takano, M. and Odawara, G. (1981) Development of new type of mobile robot TO-ROVER, *Proc. 11th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Takata, S. and Kishimoto, Y. (1977) Fire fighting robot. *Proc. 7th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Tanil, K., Komoriya, K., Kaneko, M., Tachi, S. and Fujikawa, A. (1984) A high resolution tactile sensor, *Proc. 4th Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Tarvin, R. L. (1980) Considerations for off-line programming a heavy duty industrial robot. *Proc. 10th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Taylor, M. J. (1978) Large scale manipulator for space shuttle payload handling. *Proc. 26th Conf. Remote Systems Technology*.
- Thring, M. W. (1983) *Robots and Telechairs*, Ellis Horwood.
- Toyama, S. and Takano, M. (1981) Study on speed-up of robot motion. *Proc. 11th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Trounov, A. N. (1984) Applications of sensory models for adaptive robots. *Proc. 4th Internat Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Turner, T. L., Craig, J. J. and Gruver, W. A. (1984) A microprocessor architecture for advanced robot control, *Proc. 14th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- VAL (undated) *User's Guide to VAL*, Version 12, No. 398-H2A, Unimation.
- Vicentine, P. (1983) Robotics changes the production system and social aspects of work, *Ital. Mach. Equip.* March.
- Volz, R. A., Mudge, T. N. and Gal, D. A. (1983) Using ADA as a robot system programming language, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- von Gizycki, R. (1980) Social conditions for and consequences of the use of industrial robots in five factories, *Proc. 10th Internat. Symp. Industrial Robots*.

- Vranish, J. M. (1984) Magnetoresistive skin for robots. *Proc. 4th Internat. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*.
- Vukobratovic, M. (1973) How to control artificial anthropomorphic systems *IEEE Trans. Syst. Man Cybernet.* Vol. SMC-3. No. 5, September, pp. 497-507.
- Waltz, D. L. (1975) Understanding line drawings of scenes with shadows, in *The Psychology of Computer Vision* McGraw-Hill.
- Wang, S. S. M. and Will, P. M. (1978) Sensors for computer controlled mechanical assembly, *The Industrial Robot*, March, pp. 9-18.
- Warnecke, H.-J. and Schraft, R. D. (1979) *IndustrieroBoter*, Krausskopf-Verlag Mainz.
- Warnecke, H.-J. and Schraft, R. D. (1982) *Industrial Robots Application Experience*, IFS Publications.
- Wells, H. G. (1905) *A Modern Utopia* Chapman and Hall.
- Whitney, D. E. and Nevins, J. L. (1979) What is the remote center compliance and what can it do? *Proc. 9th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Wickman (undated) *Wickman Programmable Logic Systems*, Wickman Automation Ltd.
- Williams, V. (1984) Employment implications of new technology, *Employment Gazette*, May, pp. 210-215.
- Winograd, T. (1972) *Understanding Natural Language*, Academic Press.
- Winston, P. H. (1975) Learning structural descriptions from examples, in *The Psychology of Computer Vision*, McGraw-Hill.
- Winston, P. H. (1977) *Artificial Intelligence*, Addison-Wesley.
- Wood, B. O. and Fugelso, M. A. (1983) MCL, the manufacturing control language, *Proc. 13th Internat. Symp. Industrial Robots*.
- Yakimovsky, Y. and Cunningham, R. (1978) A system for extracting three dimensional measurements for a stereo pair of TV cameras *Computer Graphics and Image Processing*.
- Yonemoto, K. (1981) The socio-economic impacts of industrial robots in Japan, *The Industrial Robot*, December, pp. 238-241.



# Índice

---

- accidentes, 354
- acomodo, 297
- actuadores, 33
- actuadores eléctricos, 33, 118
- aire comprimido, 117
- aislamiento óptico, 208
- amplificador humano, 305
- amplificador operacional, 200
- análisis de escena, 273
- análisis de riesgos, 299
- antropomórfico, 30, 87
- aplicaciones
  - robots, 277
  - teleoperadores, 305
- aplicaciones de los robots, 37, 277, 338
- árbol de levas, 22
- articulaciones, 49
- autómata, 22
- automatización, 28
  
- bandas transportadoras, 122
- bomba hidráulica, 120
- botón muerto, 227
- botonera, 227, 355
- brazo de robot para ensamble con
  - grado de cedencia selectivo, 296
- brazo esclavo, 305
  
- bus (conductor colectivo), 236
- CAD/CAM, 45
- cámara vidicon, 263
- capacidades humanas, 18, 303
- características de un motor de corriente directa (CD), 132
- cargas de gravedad, 151, 170
- CCD, 263
- celda de trabajo, 293
- celdas de carga, 199
- célula de trabajo, 39
- centro de la herramienta, 217
- cibernética, 303
- cifrado, 265
- cilindro hidráulico, 116
- CNC, 46
- codificador, 183
- codificador absoluto, 187
- codificador incremental, 189
- código Gray, 188
- compensación, 159, 171
  - en cascada, 160, 169
  - retroalimentación, 160, 166
- compensación de retroalimentación,
  - 160, 166
- compensación en cascada, 160, 169
- componentes de retroalimentación, 181

- comunicación, humana, 20
- concordancia con plantilla, 267
- contrapeso, 225
- control, 22
  - continuo, 159
  - de la razón de cambio en posición (rapidez), 176, 306
  - de posición, 176, 306
  - de un solo eje, 164, 236
  - de la secuencia, 144, 214
  - digital, 173
  - dinámico, 178
  - dispositivo de entrada, 316
  - de un sistema lineal, 161
  - trayectoria, *véase* control de trayectoria
  - válvulas, 123
- control automático, 22, 26
- control basado en el tiempo, 24, 144
- control basado en eventos, 24, 145
- control cinemático, 156
- control continuo, 159
- control de ejes, 236
- control de malla cerrada, 24, 161
- control de posición, 165, 306
- control de posición de un robot, 176
- control de réplica, 318
- control de la secuencia, 144, 214
- control de la trayectoria, 153, 212
  - cinemática, 156
  - continua, 212, 222
  - geométrica, 153
  - punto a punto, 212, 216
- control de trayectoria continua, 34, 222
  - véase* también control de punto a punto
- control de un solo eje, 164
- control de velocidad, 156, 176, 306
- control derivativo, 169
- control desacoplado, 178
- control digital, 173
- control dinámico, 178
- control expandido por computadora, 332
- control geométrico, 153
- control integral, 170
- control numérico, 46
- control numérico directo, 46
- control por computadora, 211
- control punto a punto, 34, 216
  - con interpolación lineal, 220
- control punto a punto coordinado terminalmente, 217
- control punto a punto no coordinado, 217
- control secuencial, 216, 218
- control sin servo, 34
- controlador de tres términos, 169, 174
- controlador lógico programable (PLC), 146
- controlador proporcional integral derivativo (PID), 169, 174
- controlador del robot, 33
- controles de proceso, 26
- conversión analógica a digital, 181, 200, 203, 207
- conversión analógica a digital por aproximaciones sucesivas, 206
- conversión digital a analógica, 181, 202
- convertidor analógico a digital, 181, 200, 203, 207
  - aproximación sucesiva, 206
  - de doble rampa, 205
- convertidor digital a analógico, 181, 202
- coordenadas de máquina, 69
- coordenadas homogéneas, 73
- costo unitario, 343, 347
- CP, 212, 222
- cuadrupléticos, 322, 330
- curvas de acoplamiento, 54
- detección al tacto, 244
- detección de bordes, 264
- detección de posición, 183
- detección de proximidad, 253
- detección óptica de rango, 260
- detector acústico de proximidad, 255
- detector óptico de proximidad, 257
- detector sin contactos, 255

determinación de rango, 259  
 diada, 46  
 diagrama de flujo, 215  
 diferenciales, 82  
 dinámica de Lagrange, 150, 362  
 dinámica de Newton, 150, 153  
 diodo emisor de luz, 258  
 doblado, 299  
  
 ecuación característica, 163, 169  
 ecuación en diferencias, 175  
 efector final, 89  
 eficiencia de un motor de corriente  
     directa (CD), 132  
 eigen valores o  
     valores característicos, 163  
 empaque, 297  
 empleo, 356  
 energía consumida durante  
     el desplazamiento, 108  
 engranes, 138  
     cilíndrico, 138  
     epicíclico, 139  
     plano, 141  
     sinfín, 139  
     transmisión armónica, 140  
 engranes rectos, 138  
 ensamble, 43, 87, 295  
 enseñanza, 224, 355  
 entradas de voz, 319  
 eslabones paralelos, 153  
 esmaltado, 291  
 estabilidad, 163  
 estabilidad al caminar, 102  
 estereoscopia, 269  
 estudio de la BRA, 335  
  
 fábrica automatizada, 45  
 fabricantes, 339  
 factores económicos, 335  
 factores sociales, 351  
 flexibilidad, 344  
 "Flexspline", 141  
 flujo de efectivo descontado, 346  
 fototransistor, 259

fuentes de poder, 237  
 fuerzas centrífugas, 151  
 fuerzas de Coriolis, 151  
 función de transferencia  
     de malla cerrada, 161  
  
 galga tensométrica, 195  
 generador de ondas, 140  
 grado de cedencia, 45  
 grado de cedencia con centro  
     remoto, 90, 292  
 grados de libertad, 50, 52  
  
*hardware* (equipo de cómputo), 233  
 hidráulico, accionamiento, 115  
 hombre/máquina, 27  
  
 impulsor armónico, 140  
 impulsor de cable, 136  
 impulsor de cadena, 136  
 impulsor sinfín, 139  
 impulsores remotos, 135  
 inclinación, 88  
 industria, 340  
 industria de los robots, 340  
 inspección, 42, 301  
 inteligencia artificial, 244, 272, 338  
 interfases, 239  
 interfase (instrumentación de), 208  
 interfase en paralelo, 239  
 interpolación, 220  
 interruptor de proximidad  
     magnética, 255  
 inyección de metales, 300  
  
 jacobiano (matriz jacobiana), 156  
 justificación financiera, 342  
  
 lenguaje de alto nivel, 231  
 lenguaje de robot, 230  
 lenguaje ensamblador, 232  
 lenguaje objetivo, 230  
 lenguajes, 229  
 lenguajes comerciales, 230  
 lenguajes de máquina, 232



- percepción visual, 273
- pérdidas, 132
- perforar, 298
- perturbaciones, 82
- piezoelectricidad, 196
- piezorresistividad, 246
- pintura, 41, 292
- pixel, 263
- población de robots, 37, 336
- potenciómetro, 184
- precisión, 67, 85
- problema inverso, 69, 82
- procesamiento de la imagen, 264
- programación, 23, 35
- programación en línea, 225
- programación fuera de línea, 35
- programación por enseñanza, 35, 224
- programación manual, 35
- programador de árbol de levas, 144
- prótesis, 305, 320
- PUMA, 79
  - sistema de soldadura por arco, 288
- punto a punto (PTP), 212, 216
- punto central de la herramienta, 216
- puntos de prensión, 353
- punto de referencia, 181
  
- rampa de aceleración, 221
- rampa de desaceleración, 221
- rampa dual de conversión analógica a digital, 203
- reconocimiento, 266
- reconocimiento de objetos, 266
- reconocimiento de palabras, 320
- reconocimiento de patrón, 329
- reconocimiento del habla, 320
- recorte de plantillas, 298
- recubrimiento de la superficie, 41
- recuperación de la inversión, 343
- reguladores, 26
- relaciones laborales, 357
- resistencia magnética, 248
- resistencia variable, medición de posición por, 184
- resolución, 67, 185, 190
  
- resolvedor, 185
- resolvedor sin escobillas, 187
- resonancia, 163
- respuesta en frecuencia, 162
- restricción magnética, 248
- retroalimentación de estado, 168
- retroalimentación de velocidad, 166
- robot cartesiano, 65
- robot cilíndrico, 66
- robot con armadura, 296
- robot de segunda generación, 38, 243
- robot esférico, 66, 67
- robot móvil, 97, 260
- robot T3, 227, 239
- robots de primera generación, 243
- rociado, 292
- rueda sin rin (llanta), 99
- rueda veneciana, 99
- ruedas, 97
  
- SCARA, 296
- secuencia de pisadas, 100
- secuencia reubicable, 298
- seguimiento, 223
- seguridad, 351, 353
- selección de charolas, 268
- selección y colocación, 29, 122, 144, 146
- selector unitario, 23
- sensor de alcance ultrasónico, 260
- sensor de deslizamiento, 249
- sensor de fuerza generalizada, 250
- sensor de proximidad eléctrica, 255
- sensor Fotónic, 257
- sensores táctiles, 244
- sentidos de un robot, 243
- sentidos, humanos, 19, 304
- servicio a máquinas herramienta, 38, 293
- servocontrol, 34
- servomecanismo electrohidráulico, 128, 182, 315
- servomecanismo hidráulico, 127
- servomecanismos, 26
- servoválvulas, 124

- síntesis numérica, 51
- sistema de error común, 310
- sistema de manufactura flexible (FMS), 46, 97
- sistema de retroalimentación de fuerza, 313
- sistema de cascada, 145
- sistemas de accionamiento o impulso, 115
- sistemas de segundo orden, 161
- sistemas expertos, 273
- sistemas lineales, 161
- software, 229
- soldadura, 40, 215, 245, 278, 284
- soldadura MIG, 284
- soldadura por arco, 284
  - MIG, 284
  - Sistema PUMA, 288
  - TIG, 284
- soldadura por puntos, 40, 277
- soldadura TIG, 284
- tablero de conexiones, 23
- tacogenerador (generador tacométrico), 194
- tacogenerador de reluctancia variable, 194
- taladrar, perforar, 226
- teclado, 237
- técnico, robot, 359
- teleoperador bilateral, 309, 310
- teleoperador unilateral, 305, 309
- teleoperadores, 31, 303
- teléstesis, 330
- tenazas, 89
- tenazas de acción suave, 94
- tenazas de vacío, 90
- tenazas dobles, 295
- tenazas magnéticas, 93
- tenazas universales, 93
- tornillo de bolas recirculantes, 137
- transformaciones, 72
- transformador giratorio diferencial variable (RVDT), 185
- transformador lineal diferencial variable, 185
- transmisión
  - armónica, 140
  - cadena, 136
  - de banda, 136
  - directa, véase transmisión directa
  - por cable, 136
  - remota, 136
- transmisión armónica, 140
- transmisión cuasi directa, 135
- transmisión directa, 119
  - motores de, 135
  - cuasi-, 135
- transmisión indirecta, 119
- transmisión mecánica, 135
- tren de engranes epicíclico, 139
- triangulación pasiva, 269
- VAL, 35, 288
- válvula con boquilla de tapa móvil, 125
- válvula de carrete (bobina), 125
- vehículos guiados automáticamente, 47
- vehículos sobre rieles, 97
- ventajas de los robots, 34
- visión, 262, 292
- visión artificial, 262
- zona de trabajo, 66

—o0o—