

AAU

AMERICAN ANDRAGOGY
UNIVERSITY



93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

Robótica

CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES







FERNANDO REYES CORTÉS


93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

Contenido

Plataforma de contenidos interactivos	XIX
Página Web del libro	XX
Prólogo	XXV
Capítulo 1 Robótica	1




1.1 Introducción	3
 Cirugía robotizada	7
1.2 Tipos de robots	9
1.2.1 Robots móviles	9
 Robots móviles	9
1.2.2 Robots humanoides	10
 Robots humanoides	11
1.2.3 Robots industriales	12
 Componentes de un robot	16
1.3 Control de robots manipuladores	17
1.4 Tecnología de robots	19
 Sistema de engranes	20
 Servomotores de transmisión directa	21


1.5 Estadísticas de robótica	23
1.6 Historia de la robótica	26
 Contribuciones de Leonardo	28
1.7 Sociedades científicas de robótica	33
1.8 Resumen	37
1.9 Referencias selectas	38
1.10 Problemas propuestos	42

Capítulo 2

Servomotores y sensores

45



2.1 Introducción	47
2.2 Servomotores	49
2.2.1 Principios básicos de motores eléctricos	53
 Sistemas de engranaje	56
2.2.2 Servomotores de transmisión directa	58
 Tecnología de transmisión directa	58
 Programación de robots manipuladores	62
2.3 Sensores	69
2.3.1 Resolvers	70
2.3.2 Potenciómetros	71
2.3.3 Tacómetro	72
2.4 Encoders	73
2.4.1 Encoder incremental	77
2.4.2 Encoder Absoluto	80

2.4.3 Encoder magnético	83
2.4.4 Aspectos importantes de los encoders	85
2.4.5 Construcción de un encoder incremental	87
 Encoder incremental	88
2.4.6 Glosario para encoders	89
2.5 Resumen	90
2.6 Referencias selectas	92
2.7 Problemas propuestos	94

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528




ebrary

Capítulo 3	
Preliminares matemáticos	97

3.1 Introducción	99
3.2 Vectores	100
3.2.1 Operaciones entre vectores	102
3.2.2 Norma euclidiana	105
3.3 Matrices	106
3.3.1 Matrices especiales	108
3.3.2 Operaciones de matrices	109
 Operaciones con matrices	109
 Producto de matrices	112
3.3.3 Norma espectral	126
3.4 Funciones definidas positivas	128
3.4.1 Derivadas parciales de funciones de energía	137
3.5 Sistemas dinámicos	144


93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528

ebrary

3.5.1 Puntos de equilibrio	148
3.6 Teoría de estabilidad de Lyapunov	150
3.6.1 Estabilidad en el sentido de Lyapunov	152
3.6.2 Función candidata de Lyapunov	157
3.6.3 Método directo de Lyapunov	158
 Simulación de sistemas dinámicos	166
 Sistema dinámico no lineal	174
 Péndulo	182
3.6.4 Principio de invariancia de Lasalle	183
3.7 Norma \mathcal{L}	186
3.7.1 Relación entre \mathcal{L} y estabilidad de Lyapunov	189
3.8 Resumen	192
3.9 Referencias selectas	194
3.10 Problemas propuestos	197

Capítulo 4

Cinemática de robots manipuladores 201

4.1 Introducción	203
4.2 Morfología del robot	203
4.3 Transformaciones homogéneas	208
 Transformaciones homogéneas	209
4.4 Cinemática	210
4.4.1 Convención Denavit-Hartenberg	212
4.4.2 Selección de sistemas de referencia	214




4.4.3 Algoritmo Denavit-Hartenberg	217
4.4.4 Cinemática diferencial	218
4.5 Tipos de robots industriales	221
4.5.1 Robot antropomórfico (RRR)	231
4.5.2 Configuración SCARA (RRP)	236
4.5.3 Configuración esférica (RRP)	238
4.5.4 Configuración cilíndrica (RPP)	241
4.5.5 Configuración cartesiana (RRR)	243
4.6 Resumen	245
4.7 Referencias selectas	246
4.8 Problemas propuestos	248

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

Capítulo 5	
Dinámica de robots manipuladores	251


5.1 Introducción	253
5.2 Ecuaciones de Euler-Lagrange	255
5.3 Modelo dinámico	257
5.3.1 Propiedades del modelo dinámico	259
5.3.2 Efecto inercial	259
5.3.3 Fuerzas centrípetas y de Coriolis	261
5.3.4 Par gravitaciona	262
5.3.5 Fenómeno de fricción	263
5.3.6 Linealidad en los parámetros	264
5.3.7 Modelo de energía	266
5.3.8 Modelo de potencia	267

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

5.3.9 Ejemplos de modelado dinámico	267
 Péndulo robot	275
 Robot de 2 gdl	286
5.4 Modelo dinámico cartesiano	287
5.4.1 Propiedades del modelo dinámico cartesiano	290
5.5 Identificación paramétrica	291
5.5.1 Mínimos cuadrados	293
5.5.2 Algoritmo recursivo de mínimos cuadrados	295
 Mínimos cuadrados	301
5.5.3 Modelo de regresión dinámico filtrado	302
5.5.4 Regresión lineal del modelo de energía	304
5.5.5 Modelo de regresión de la potencia filtrada	307
5.6 Robot experimental de 3 gdl	315
5.7 Resumen	322
5.8 Referencias selectas	323
5.9 Problemas propuestos	327

Capítulo 6



Control de posición de robots manipuladores 331

6.1 Introducción	333
6.2 Regulación	334
6.2.1 Control PD	336
6.2.2 Análisis cualitativo del control PD	342
 Control PD péndulo	343

• Videos del péndulo	346
• Simulador péndulo	352
• Robot 2 gdl PD	355
• Videos experimentales. Control PD de un péndulo	356
6.2.3 Control proporcional integral derivativo	357
• PID	358
6.3 Moldeo de energía	359
6.3.1 Control con acciones no acotadas	365
6.3.2 Control con acciones acotadas	376
6.3.3 Ejemplos de algoritmos de control de posición	390
6.4 Índice de desempeño	394
6.5 Aplicaciones de control de posición	404
6.5.1 Control cartesiano	404
6.5.2 Visual servoing	411
• Visual servoing	411
6.5.3 Control punto a punto	413
6.5.4 Programación de instrucciones robot	415
• Inteligencia artificial	415
6.5.5 Robótica industrial	419
• Programación FANUC	421
6.6 Resumen	423
6.7 Referencias selectas	424
6.8 Problemas propuestos	431





93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

Capítulo 7	
Control de trayectoria de robots manipuladores	437

7.1	Introducción	439
7.2	Control PD +	443
7.2.1	Análisis de estabilidad asintótica PD+	446
7.3.	Moldeo de energía PD+	451
7.3.1	Ejemplos de control de trayectoria tipo PD+	456
7.4	Control par calculado	459
7.4.1	Moldeo de energía par calculado	460
7.5	Aspectos prácticos	464
	Esquemas de control de trayectoria	464
	Videos de robots manipuladores	465
7.6	Resumen	465
7.7	Referencias selectas	466
7.8	Problemas propuestos	469

Capítulo 8	
Control de fuerza/impedancia	471

8.1	Introducción	473
8.2	Sensores de fuerza/par	475
8.2.1	Transductor Nano17	476
8.2.2	Transductor Gamma	477



8.2.3 Transductor Omega250	477
8.3 Sistemas hápticos	479
8.4 Modelado del entorno	481
8.5 Control de fuerza	481
8.5.1 Control de fuerza con lazo interno de posición	482
8.5.2 Control de fuerza: lazo interno de velocidad	483
 Sistema robótico controlado por fuerza	484
8.6 Control híbrido de fuerza/posición	485
 Robot manipulador SCARA	487
8.7 Control de impedancia	488
8.7.1 Control de impedancia con base en par	490
 Robot cartesiano de 1 gdl	491
8.7.2 Control de impedancia con base en posición	491
8.7.3 Enfoque alternativo al control de impedancia	493
 Robot manipulador de 2 gdl	495
8.8 Aplicaciones	498
8.9 Resumen	503
8.10 Referencias selectas	504
8.11 Problemas propuestos	507

Capítulo 9

Robótica móvil

509

9.1 Introducción	511
9.2 Robots móviles	513

9.2.1 Descripción de un robot móvil con ruedas	513
9.2.2 Tipos de ruedas	515
9.3 Configuración de robots móviles	520
9.3.1 Configuración Ackerman	520
9.3.2 Configuración triciclo clásico	521
9.3.3 Direccionamiento diferencial	521
9.3.4 Configuración síncrona	522
9.3.5 Movilidad y direccionalidad	523
9.4 Cinemática de robots móviles	526
9.5 Dinámica de robots móviles	529
9.6 Control de robots móviles	530
 Robot móvil tipo unicycle	533
9.6.1 Control por retroalimentación no lineal	536
 Robot móvil tipo (2,0)	539
9.7 Resumen	541
9.8 Referencias selectas	542
9.9 Problemas propuestos	544

Índice analítico

547

Plataforma de contenidos interactivos

Para tener acceso al material de la plataforma de contenidos interactivos de **Robótica. Control de robots manipuladores**, siga los siguientes pasos:



1) Ir a la página

<http://virtual.alfaomega.com.mx>



2) Registrarse como usuario del sitio.



3) Ingresar al apartado de inscripción de libros, o bien identificar este libro en el catálogo, y registrar la siguiente clave de acceso.



4) Para navegar en la plataforma ingrese los nombres de *Usuario* y *Contraseña* definidos en el punto dos.

Página Web del libro

En la página Web del libro se cuenta con los siguientes recursos:



Videos experimentales

Videos experimentales con prototipos científicos se encuentran disponibles en el sitio Web del libro para mostrar aspectos cualitativos de diversos algoritmos de control y desempeño.



1) Videos de prototipos desarrollados en el laboratorio del autor, y que en general son la implementación de la teoría de los robots manipuladores.



2) Videos que muestran la aplicación de los robots manipuladores en la medicina y en la industria.



Simuladores

Como un paso previo a la etapa experimental, se encuentra el estudio y análisis de esquemas de control a través de simuladores de robots manipuladores. En el sitio Web se encuentran disponibles simuladores del péndulo robot y de un robot planar de 2 grados de libertad.



Código fuente

Se incluyen más de 30 programas escritos para MatLab versión 10 relacionados con sistemas dinámicos lineales y no lineales, robots manipuladores, algoritmos de control, trazo de curvas o trayectorias, etc.



Lecturas complementarias

1) Adicional a los 9 temas que integran la obra, también se incluyen en el sitio Web del libro tres temas relacionados con el control de robots manipuladores:



Visual servoing.



Robótica industrial



Inteligencia artificial

2) Se presentan artículos publicados en revistas especializadas en los que se expone temas de matrices homogéneas, control de cinemática, dinámica, identificación paramétrica y control de robots manipuladores.



Respuesta y desarrollo de problemas seleccionados

Para el estudiante se encuentra en la página Web la solución completa de una selección de ejercicios planteados en los capítulos del libro. En la solución de dichos ejercicios se detallada los pasos teóricos y su implicaciones prácticas.



Recursos para el profesor

- 1) Solución completa de todos los problemas propuestos en el libro.
- 2) Apoyo de material didáctico a través de diapositivas de cada capítulo para exposición en clase.



Simbología e iconografía utilizada


Con el fin de que el lector identifique fácilmente los recursos didácticos que se presentan en el libro sobre conceptos, teoremas, corolarios, código fuente, llamadas a Web, etc., a lo largo de la exposición se utiliza la siguiente simbología:

Notas al margen

Las notas al margen son representadas por una caja o recuadro con una tachuela pegada en su esquina superior izquierda

Notas al margen proporcionan información básica teórica o práctica sobre algún concepto o definición que se esté tratando en la exposición central del libro.

Notas al margen se encuentran representadas por cajas que pueden aparecer en el margen izquierdo o derecho de una sección. Proporcionan información adicional o complementaria a los diversos conceptos que se encuentran en exposición.

A lo largo de la presenta obra es común encontrar el icono  el cual tiene la intención de llamar la atención del lector para remarcar alguna idea o concepto.



Teorema 1.1 moldeo de energía

El teorema se encuentra asociado con su nombre descriptivo, un ícono distintivo, y un número de referencia que será utilizado en otras secciones o capítulos posteriores.



Corolario 1.1 Funciones de energía

Los corolarios al igual que los teoremas tienen asociados su nombre descriptivo, un ícono que los identifica, y un número de referencia que puede ser empleado para futuras citas.

Propiedades matemáticas del modelo dinámico o de algoritmos de control se encuentran identificadas como

Propiedad 1.1 describe en que consiste dicha propiedad.

Ejemplos

Los ejemplos ilustrativos que se encuentran resueltos en la obra están clasificados con respecto a su grado de complejidad en tres formas posibles: simple o básico, regular y complejo.

Los ejemplos simples se encuentran identificados por un símbolo ♣, complejidad regular por ♣♣ y complejo por ♣♣♣.

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

♣ Ejemplo 1.1

Este ejemplo ilustrativo indica que su nivel de complejidad es simple o básico. Adicional al símbolo ♣, también incluyen un número de referencia que lo identifica al capítulo donde fue definido. El enunciado de los ejemplos se encuentra en un recuadro con fondo gris; también se indica el recuadro de solución y la terminación del ejemplo por 3 cuadros posicionados a la derecha del margen.

Solución

Se plantea la solución del ejemplo y se finaliza el desarrollo del mismo con una serie de 3 cuadros pequeños posicionados a la derecha de la página, los cuales definen la separación con los siguientes párrafos.



Programas

Todos los programas de este libro han sido implementados en lenguaje MatLab versión 10. Se encuentran identificados por un recuadro con el icono **if**, número de referencia, cabecera con información del capítulo al que pertenecen, nombre del sistema a simular, nombre del archivo

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary
ALFAOMEGA

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS

MatLab y el código fuente.



Llamadas a Web

En el sitio Web del libro se encuentran programas en código fuente MatLab versión 10, simuladores, videos experimentales con robots manipuladores y sistemas mecánicos, documentos técnicos y científicos, ejemplos ilustrativos e información complementaria.

Es necesario resaltar que la información contenida en el sitio Web no es estática, es decir se estará actualizando y mejorando con la finalidad de brindar al lector la mejor calidad de servicio en apoyo didáctico a la investigación, docencia y desarrollo tecnológico.

if Código Fuente 1.1 Nombre de sistema a simular

```
%capítulo#_nombre.m      Editorial Alfaomega
%Libro: Robótica. Control de Robots Manipuladores
%Capítulo # nombre del capítulo
```

Nombre de sistema a simular

```
1 %
2 | Se inserta el código fuente para MatLab
3 | comentarios
4 | instrucciones, etc.
5 %
```

Referencias bibliográficas

Los símbolos empleados en las referencias son la siguientes:



Se emplea para identificar un libro o proceedings.



Utilizado para identificar una revista científica ya sea Journal o Transactions.



Indica una dirección electrónica.

Prólogo

Hoy en día, el avance de la tecnología se encuentra en constante crecimiento. El desarrollo tecnológico es un aspecto estratégico para todo país en vías de crecimiento. La trascendencia del desarrollo científico no se limita a sus consecuencias económicas, también contribuye a elevar la vida política y social, aumenta la reflexión y conocimiento de la sociedad sobre sí misma, y por tanto la capacidad del país para dirigir su propio destino. Asimismo, favorece las posibilidades para que la población obtenga beneficios colectivos de gran importancia, entre ellos, mejorar la salud y calidad de vida.

En base a la experiencia de países avanzados, el desarrollo científico y tecnológico influye de manera significativa en la vida de sus habitantes, reflejándose en la capacidad para crecer y absorber tecnologías más productivas. Aun más, el poderío de una nación depende de su capacidad para innovar tecnología de manera permanente, de tal forma que, con el avance de la generación y aplicación de los conocimientos se incrementa la calidad y los procesos de producción se vuelven más complejos y especializados. Ambos aspectos aumentan la demanda de mano de obra calificada; misma que exige una remuneración más alta y se abren más oportunidades para ascender a mejores puestos de trabajo en todo el aparato productivo. Lo anterior repercute positivamente en la economía, puesto que genera ahorro interno.

La Robótica como parte de la automatización y de la mecatrónica genera tecnología, siendo una área estratégica para el país, ya que su impacto no sólo repercute en aspecto políticos y económicos, también forma parte importante de la vida cotidiana, educación, cultura, y en la sociedad. El progreso de la ciencia y tecnología han transformado el concepto de robot, lo que era un androide de ciencia ficción, ha pasado a ser un sofisticado instrumento de ingeniería. A partir de los años de 1960 se han colocado

robots industriales con mucho éxito en las cadenas de producción de la industria, por ende, hoy en día, la palabra **robot** es sinónimo de automatización, ya que es capaz de **ofrecer** un amplio espectro de aplicaciones en el mundo real y al mismo tiempo abre nuevas fronteras para el desarrollo de la industria y bienestar de la sociedad. Entre las ventajas que ofrecen los robots se encuentran: reducción de costos, incremento de la productividad, mejora la calidad del producto, reducir problemas de operación en ambientes hostiles y peligrosos al hombre tales como radiactivos, nucleares, militares, etc.

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

Es importante resaltar que la comunidad científica de robótica en México desde hace algunos años ha experimentado un crecimiento importante en cuanto al número de instituciones e investigadores que la componen, así mismo ha de subrayarse el incremento en calidad y cantidad de graduados y publicaciones en el área. Sin embargo, México aún cuenta con una infraestructura pobre en materia de laboratorios de robótica para propósitos de investigación científica y experimentación, por lo que dificulta el desarrollo propio de dicha área en el país. En contraste, los países desarrollados destinan inversiones considerables en investigación y desarrollo de robots, técnicas de adaptación y aprendizaje, modelado de robots, control de movimiento, planificación y coordinación e inteligencia artificial.

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

El objetivo primordial de la presente obra es presentar los fundamentos del control de robots manipuladores y sus aplicaciones. Se pretende hacer énfasis al lector de la necesidad de aprender *lo necesario* de matemáticas y física para adquirir el rigor científico que se requiere en el análisis y diseño de robots manipuladores y sus algoritmos o estrategias de control.

El contenido de este libro está dirigido a estudiantes del área de ingeniería con el entusiasmo necesario para incursionar en el área de control del robots. Particularmente, el temario es *ad hoc* para las ingenierías en electrónica, sistemas, computación, industrial y mecatrónica. Sin embargo, también puede ser tomado como texto en cursos de robótica o

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

mecatrónica a nivel posgrado.

La obra sirve para el trabajo autodidacta, es decir se pretende que con el material del presente libro el lector pueda aprender por sí mismo el tópico de control de robots manipuladores ya que está escrito para alumnos, más que para profesores; hasta donde es posible, cada concepto que aparece por primera vez se define claramente y se explica cuidadosamente con detalle. Para introducir y sugerir resultados se incluyen ejemplos de simulación auxiliados por computadora con código fuente en MatLab versión 10 y se proporciona una serie de ejercicios para complementar y facilitar los conocimientos adquiridos. Gran parte del material de esta obra está basado en la experiencia científica y profesional que ha tenido el autor.

La organización de este libro consta de cuatro partes: fundamentos de la robótica, modelado, control de robots manipuladores y tópicos selectos de robótica. La primera parte describe un panorama general de la robótica, desarrollo tecnológico y las bases matemáticas requeridas para analizar y diseñar estrategias de control de robots manipuladores. Esta primer fase está integrada por tres capítulos de la siguiente forma: introducción a la robótica, servomotores y sensores, y preliminares matemáticos. La segunda parte se compone de dos capítulos destinados al modelado de robots manipuladores: cinemática y dinámica de robots manipuladores. La tercera fase cubre el tema de control de robots manipuladores para regulación y control de trayectorias. Finalmente, la cuarta parte contiene dos temas: tópicos selectos de la robótica tales como control de fuerza/impedancia y robótica móvil. Al final de cada capítulo se presenta bibliografía selecta y un conjunto de problemas propuestos para mejorar la habilidad y grado de conocimiento en los temas abordados. Adicionalmente se incluyen en el sitio Web del libro temas relacionados con robots manipuladores como visual servoing, robótica industrial e inteligencia artificial.

El **Capítulo 1 Robótica** presenta una introducción a esta área, mostrando los antecedentes históricos más relevantes de la robótica hasta nuestros

días, resalta la importancia actual como área clave y estratégica de todo país en desarrollo. Asimismo, se presentan sus principales aplicaciones en el sector social, científico e industrial. Un concentrado de páginas Web y ligas electrónicas de las principales sociedades científicas de robótica y de la automatización: journals, transactions, y congresos.

Capítulo 2 Servomotores y sensores se presentan los principales servomotores para diseño y construcción de robots manipuladores con sistemas de engranaje y transmisión directa (direct-drive). Sensores internos de posición de los robots son presentados: encoders, resolvers y métodos sencillos convencionales para obtener la velocidad.

La primera parte del libro finaliza con el **Capítulo 3 Preliminares matemáticos**. Contiene el tratamiento matemático necesario para entender la dinámica y control de robots manipuladores. La robótica es una área científica multidisciplinaria que requiere de la madurez y solvencia del lenguaje elegante y universal de las matemáticas. Este capítulo está destinado a presentar las herramientas matemáticas necesarias para analizar y diseñar esquemas de control para robots manipuladores. Matemáticas básicas desde operaciones mixtas entre vectores y matrices, gradientes, jacobianos, sistemas dinámicos lineales y no lineales, teoría de estabilidad de Lyapunov, estabilidad \mathcal{L} , ejemplos, simulaciones y ejercicios complementarios.

La segunda parte del libro se compone de dos capítulos. Uno de ellos denominado **Capítulo 4 Cinemática de robots manipuladores** contiene la clasificación general de los robots manipuladores, representación de la posición y orientación del efector final del robot a través de matrices homogéneas. La metodología Denavit-Hartenberg es descrita para obtener la cinemática directa. También se aborda la cinemática inversa y diferencial de todas las configuraciones de robots industriales.

El **Capítulo 5** llamado **Dinámica de robots manipuladores** describe la dinámica de cuerpo rígido para robots manipuladores a través de

las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange: se explican todos los fenómenos que se encuentran presentes en el robot manipulador: efecto inercial, fuerzas centrípetas y de Coriolis, par gravitacional y fricción. Se describe el modelo dinámico del robot manipulador en coordenadas articulares y coordenadas cartesianas, propiedades matemáticas, esquemas de identificación paramétrica usando mínimos cuadrados, simulaciones, ejemplos y ejercicios sugeridos.

La tercera parte de la obra se destina al control de robots manipuladores. Regulación o control de posición es presentado a través de una de las técnicas modernas y más novedosas de control automático, moldeo de energía es la base del **Capítulo 6 Control de posición de robot manipuladores**. Moldeo de energía representa una técnica moderna para análisis y diseño de algoritmos de control de robots manipuladores consiste en generar la estructura del algoritmo de control como el gradiente de la energía potencial artificial más un término disipativo como es la inyección de amortiguamiento a través de la velocidad articular. Se presentan un número importante de nuevos esquemas de control cuyo desempeño superan al regulador tradicional PD. Se explica con detalle el funcionamiento cualitativo de los algoritmos de control a través de simuladores y experimentos con robots manipuladores.

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528

ebrary La técnica de moldeo de energía se generaliza para el caso de control de trayectoria y amplía el horizonte de los algoritmos tradicionales PD+ y Par Calculado hacia una familia muy extensa de esquemas de control abordados en el **Capítulo 7 Control de trayectoria de robots manipuladores**.

Tópicos especiales de robótica se presenta en la última parte de esta obra compuesto por dos capítulos. Uno de ellos el **Capítulo 8 Control de fuerza/impedancia** es un caso particular de control cartesiano. Un enfoque de diseño de control de impedancia es presentado y sus aplicaciones a fisioterapia y rehabilitación, y finalmente **Capítulo 9 Robótica Móvil** incluye modelado cinemático, configuraciones de llantas, modelo dinámico

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528

co de robots móviles con restricciones holonómicas, diseño de esquemas de control, simulaciones y diseño.

Adicionalmente en el sitio Web del libro se incluyen temas complementarios de la robótica como: **visual servoing** el cual es un enfoque de control cartesiano donde se emplea la información proporcionada por una cámara de video del tipo CCD para incorporarla en el lazo de control. La estructura del esquema de control se basa en el jacobiano transpuesto. Diversas configuraciones entre el robot y cámaras de video. Se presenta el modelo del sistema de visión. Las configuración cámara fija y cámara en mano son analizadas. **Robótica industrial** describe la arquitectura y programación de robots industriales. Uso y empleo del teach pendant, grabado de puntos y datos, ejecución de trayectorias, manejo de puertos, aplicaciones, etc. Otro tema que es presentado en el sitio Web es **inteligencia artificial** el cual describe algunos algoritmos de control implementados con redes neuronales con aplicaciones en robótica.

En el portal del libro se encuentra disponible código fuente para MatLab versión 10 para el modelo dinámico de diversos sistemas mecatrónicos y robóticos, así como una variedad de estructuras de control. El código fuente pretende ser un *tool box* de robótica para MatLab con la finalidad de reforzar los conocimientos de los diferentes ejemplos que se analizan matemáticamente en el libro. La simulación es una herramienta imprescindible para reproducir los fenómenos físicos de un robot y por lo tanto estudiar a detalle los aspectos prácticos que intervienen en la tarea específica que debe realizar un robot industrial.

La preparación del manuscrito representó problemas multidisciplinarios, desde manejo de programas CAD, programación en MatLab, lenguaje C, experimentación y simulación con robots manipuladores. La compilación final de la presente obra fue realizada en lenguaje LaTeX, usando el paquete PCTex versión 6, donde se realizaron más de 650 librerías LaTeX para la simbología gráfica, formato y estilo del libro.

El autor desea agradecer a múltiples colegas y estudiantes que han brindado su tiempo para enriquecer el manuscrito. Principalmente al Dr. Jaime Cid, M. C. Fernando Porras, Dra. Aurora Vargas, Dr. Sergio Vergara, Dra. Amparo Palomino, M. C. Pablo Sánchez, Dra. Luz del Carmen Gómez y Dra. Olga Félix. Este esfuerzo no hubiera sido posible sin el apoyo de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Por último y de manera muy especial quiero expresar mi profundo reconocimiento al Dr. Rafael Kelly quien me brindó no sólo su amistad, sino que también contribuyó notablemente en mi formación profesional y científica durante mi estancia en el CICESE de 1994 a 1997.

Fernando Reyes Cortés

Puebla, Pue., marzo del 2011

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528
ebrary

1

CAPÍTULO

Robótica

La naturaleza nunca quebranta sus propias leyes.

Leonardo da Vinci







- 1.1 Introducción
- 1.2 Tipos de robots
- 1.3 Control de robots manipuladores
- 1.4 Tecnología de robots
- 1.5 Estadísticas de robótica
- 1.6 Historia de la robótica
- 1.7 Sociedades científicas de robótica
- 1.8 Resumen
- 1.9 Referencias selectas
- 1.10 Problemas propuestos

Objetivos





Presentar la importancia e impacto de la robótica como área científica y tecnológica, indispensable para el crecimiento y madurez de toda sociedad dinámica.

Objetivos particulares:

-  Destacar la relevancia de la robótica como área clave y estratégica.
-  Destacar el impacto de los conocimientos y tecnología en beneficio de la sociedad.
-  Describir el desarrollo histórico evolutivo y tendencia de la robótica.
-  Señalar las sociedades científicas y tecnológicas relevantes de la robótica.

Competencias

Adquirir las habilidades en el manejo de:

-  Tecnología de robots.
-  Historia de la robótica.
-  Componentes que forman a un robot.
-  Conocimiento sobre las principales sociedades científicas.

1.1 Introducción

Durante los últimos cincuenta años, la robótica no sólo ha incursionado en la industria, centros de investigación, universidades y hospitales, actualmente existen fábricas completamente automatizada mediante robots manipuladores. Hoy en día, la robótica es tan familiar que se pueden encontrar robots en el hogar realizando tareas domésticas. No obstante, se considera como un área joven en constante crecimiento.

La robótica es una disciplina científica que aborda la investigación y desarrollo de una clase particular de sistemas mecánicos, denominados *robots manipuladores*, diseñados para realizar una amplia variedad de aplicaciones industriales, científicas, domésticas y comerciales.

La naturaleza multidisciplinaria de la robótica permite involucrar una gran cantidad de áreas del conocimiento tales como matemáticas, física, electrónica, computación, visión e inteligencia artificial, entre otras, como se muestra en la figura 1.1. Por otro lado, aun cuando la robótica es un área eminentemente experimental todos sus resultados están sustentados con un estricto rigor científico.

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528 ebrary

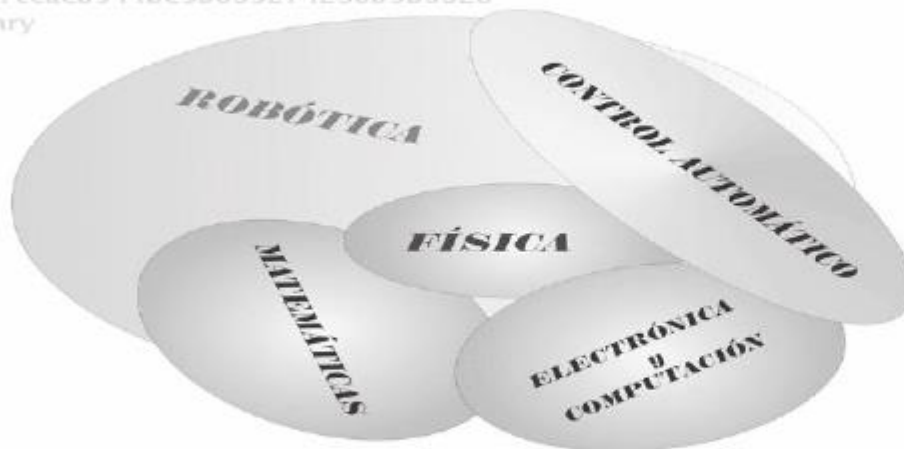


Figura 1.1 Robótica, área multidisciplinaria.

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS

Mecatrónica

La robótica estudia y analiza una clase particular de sistemas mecánicos llamados robots manipuladores, y la multifuncionalidad es la característica básica que distingue a un robot manipulador de un sistema mecatrónico. Generalmente, los sistemas mecatrónicos realizan sólo una función como en los casos de lavadoras electrónicas, despachadoras de café, aspiradoras, cortadoras de papel, etc. Es decir, la estructura mecánica de un sistema mecatrónico no está diseñada para realizar multifunciones. En contraste, en el caso de un robot manipulador su estructura mecánica le permite realizar una amplia variedad de aplicaciones, cambiando únicamente la herramienta que depende de la aplicación y por supuesto llevando a cabo la reprogramación correspondiente. Mecatrónica es un concepto de la industria japonesa de 1969, y proviene de dos palabras del idioma inglés: *mecha*, que se refiere a un sistema mecánico, y *tronics* que denota la parte electrónica, es decir, la mecatrónica integra la mecánica con la electrónica para realizar una tarea específica. En este contexto un robot manipulador es parte de la mecatrónica. Sin embargo, un sistema mecatrónico no necesariamente pertenece a la clase particular de sistemas mecánicos denominados robots manipuladores.

93d7ccaeb544be9b039274290b9b3528 ebrary

ALFAOMEGA

Karel Čapek (1890-1938)



Nació el 9 de enero de 1890 en Bohemia (Svatoňovice) perteneciente al imperio austrohúngaro. En el siglo XX fue considerado el escritor más grande en la lengua checa. En realidad a Karel Čapek no se le ocurrió el término robot para representar a los personajes androides de su novela, R.U.R. *Rossum's Universal Robots*, la cual tuvo mucho éxito al presentarse en 1920 en la ciudad de Praga. La idea original de la palabra *robot* fue de su hermano Josef, quien no ha recibido los créditos correspondientes. Después de Praga, la novela se introdujo en varias ciudades, entre ellas Londres y Nueva York, y se tradujo a varias lenguas. Muere el 25 de diciembre de 1938 en la ciudad de Praga, Checoslovaquia.

En general la *mecatrónica* es la integración de los sistemas mecánicos con la electrónica, por tanto el tipo de sistemas mecánicos que estudia y analiza la mecatrónica es mucho más general, de hecho son sistemas que realizan una determinada función mientras que los robots se caracterizan por ser sistemas mecánicos multifuncionales.

El término *robot* proviene de la palabra checa “*robota*” y significa *trabajo*; fue introducido en nuestro vocabulario por el dramaturgo Karel Čapek en 1921 en su novela satírica *Rossum's Universal Robots*, donde describe al robot como una máquina que sustituye a los seres humanos para ejecutar tareas sin descanso; a pesar de esto, los robots se vuelven contra sus creadores aniquilando a toda la raza humana. Desde aquel entonces, prácticamente a cualquier sistema mecánico con movimiento se le llama robot.

Existen varias definiciones para describir a un robot, entre ellas la que proporciona una mejor descripción es la adoptada por el *Robot Institute of America (RIA)* la cual establece:

Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas.

Esta definición que data desde 1980, refleja el estado actual de la tecnología en robótica.

Desde el punto de vista científico, los robots manipuladores como objetos de estudio ofrecen un amplio espectro en la formulación de problemas teórico prácticos debido a la naturaleza no lineal y multivariable de su comportamiento dinámico. Los robots han tenido gran aceptación en la industria, al grado de que se han convertido en elemento clave del proceso de automatización industrial, debido a los beneficios que han traído consigo, tales como reducción de costos, incremento de la productividad,

1.1 Introducción

mejoramiento de la calidad del producto y reducción de problemas en ambientes peligrosos al ser humano como, por ejemplo, ambientes radioactivos. Una de las características principales de la robótica es que como área tecnológica tiene flexibilidad para automatizar y adaptarse a ambientes laborales y su tendencia siempre estará vigente.

Entre las principales áreas que se cultivan en robótica se encuentran: control de movimiento, diseño de ambientes de programación, inteligencia artificial, sensores, visión, planificación y coordinación, entre otras. Los robots manipuladores representan nuevas fronteras para el desarrollo y bienestar de la sociedad, son piezas claves de la modernización tecnológica y han representado un factor clave de la economía mundial. Dentro de las aplicaciones en el mundo real se encuentran: teleoperación, medicina, juegos, agricultura, operaciones espaciales, manufactura, entre otras.

La robótica se ha convertido en un área clave y estratégica para todo país en desarrollo, es sinónimo de la modernización y coadyuva a proporcionar bienestar a la sociedad. Los robots pueden realizar aplicaciones de alto impacto en la sociedad, por ejemplo fisioterapia asistida por robótica donde el paciente recobra la movilidad de sus extremidades con mayor facilidad, eficiencia y menor tiempo. Particularmente, para un cierto sector de nuestra sociedad, específicamente personas con capacidades diferenciadas, los robots pueden mejorar la calidad de vida. Tal es el caso de aquellas personas que no pueden valerse por sí mismas, para éstas un robot significa un asistente impredecible que puede ayudar en sus actividades cotidianas como se muestra en la figura 1.2.

El uso de la robótica en medicina juega un papel destacado, ya que se convierte en una eficiente herramienta que permite incrementar la seguridad y exactitud en la ejecución de cirugías de alto riesgo.

Por ejemplo, utilizando la técnica de terapia asistida por computadora (CAT), la robótica permite incrementar la destreza y exactitud de cortes quirúrgicos, así como aprovechar la experiencia y conocimiento de ciru-



Figura 1.2 Rehabilitación asistida por robots manipuladores.

janos que por razones de edad o de enfermedad han perdido la habilidad y destreza que se requiere en dichas operaciones quirúrgicas (véase la figura 1.3).



Quirófanos robotizados

Los robots manipuladores dotan al médico cirujano de una importante herramienta de alto desempeño que le permite aplicar sus conocimientos en bienestar de la sociedad. Hoy en día es común ver que muchos de los hospitales del mundo se encuentran robotizados. El médico cirujano requiere de exactitud en los movimientos y precisión en la ejecución de maniobras para obtener éxito en la operación en turno. Esto sólo es posible usando robots manipuladores. El tiempo de recuperación es mucho menor, no necesariamente el paciente requiere hospitalización y en la mayoría de las veces puede salir caminando el mismo día de su operación.



Figura 1.3 Quirófano robotizado: robot da Vinci.

Desde hace varios años se han estado empleando robots manipuladores en cirugías de alto riesgo, por ejemplo cirugías de los ojos, a corazón abierto, o en situaciones mucho más complejas como retirar agua del cerebro (hidrocefalia, ver figura 1.4). La automatización de quirófanos a través de robots garantiza mayores posibilidades de éxito en las cirugías complicadas, evitando errores humanos por cansancio o fatiga, brindando al especialista un instrumental de alta precisión y esperanza de vida a los pacientes.

Un robot ha operado en París a seis pacientes a corazón abierto

La nueva técnica supone una revolución médica por su precisión y posibilidades

Un equipo de cirujanos franceses ha operado a distancia a seis pacientes a corazón abierto manipulando a través de una consola de ordenador las manipuladoras de

los brazos de robot. La técnica consiste en toda una revolución en la aplicación de la robótica a la cirugía vascular, y se dice que el robot que posea a que la primera de las operaciones por esta técnica en el hospital

de París se hizo el pasado día 9. En todos los casos, los "manos robóticas manipuladoras" dirigidas a tres metros de distancia por el doctor Alain Carpentier —compañero de trabajo con proce-

Des de sus seis pacientes —afectados por 2 afecciones muy variadas: estenosis coronaria, aneurisma de la aorta abdominal o estenosis de arteriolas renales— han sufrido un éxito a sus logros programados, prueba del enorme efecto terapéutico de las técnicas y procedimientos del robot.

Los médicos que al ingeniero Robert Vinagre y el doctor Frédéric Mazière han abierto para la empresa americana Intuitive Surgical de Stanford (California), productores de la máquina robótica, permitieron que se el sistema de control a través de una consola de ordenador que se introducen tanto las partes manipuladoras como la máquina manipuladora.

Una cámara de televisión sitúa al equipo de cirugía bajo una luz permanente ajustada y estable en tres dimensiones que facilita enormemente su trabajo ya que le permite explorar virtualmente áreas que de otro modo estarían ocultas fuera de su alcance.

Alain Carpentier, de 64 años, que es jefe del servicio de cirugía cardíaca del hospital público Bicêtre, destaca por encima de esta experiencia tecnológica "la capacidad de haber estado en el centro mismo del suceso".

La superior precisión de la máquina que reproduce virtualmente los movimientos de sus dedos de la mano del cirujano y que puede controlar y almacenar los movimientos hacen que más simple sea volver a realizarlos.

"Cuando yo hago un movimiento de 5 milímetros, se puede reducirlo a que opere en el corazón sólo lo desplaza 1 milímetro, que es una precisión maravillosa", proclama este cirujano que fue reconocido por sus colegas internacionalmente en razón de su prestigio internacional.



El brazo articulado que los operado por un paciente, conectado al sistema de París. En la otra foto, el doctor

operado. "El robot obedeció a la mano del cirujano, pero la precisión es ahora mucho mayor", añade Carpentier. "Por qué, además, nos permite intervenir en el espacio limitado y llegar a zonas complicadas que por nosotros mismos no podríamos alcanzar".

Operaciones a distancia

Según los ingenieros robóticos de la compañía americana, la capacidad del hospital Bicêtre aunque en futuro sean áreas de aplicación automática de la robótica a la cirugía.

Con todo, la posibilidad de intervenir quirúrgicamente a un paciente situado a cientos de kilómetros de distancia, hoy por hoy, con el problema de que sólo el movimiento efectivo de la máquina habría un aspecto de



Trabajo de un segundo, un riesgo demasiado grande. Trasladar de operaciones las defici-

das como las de corazón abierto. Técnicamente, la intervención instrumental exige que ambos puntos situados, conectados directamente por cable.

Por lo demás, la técnica parece ofrecer toda las garantías de seguridad. El sistema se ocupa de verificar se funcionamiento hasta 2.500 veces por segundo y se intermite automáticamente al primer problema detectado.

El riesgo de error en el ordenador está previsto y resuelto con un segundo equipo, tal y como se hace en los aviones.

Hasta ahora se han facilitado datos personales sobre ninguno de los seis pacientes. La primera operación a corazón abierto realizada a través de un ordenador fue estado producida en un año de prácticas con animales.

Otro brazo articulado, dirigido desde Mallorca, interviene en Barcelona a un enfermo de hidrocefalia

MARIA CRIVELLO, Barcelona. Un ciudadano barcelonés afectado por una hidrocefalia obstructiva crónica se beneficia de un robot — fue intervenido quirúrgicamente al pasar un momento en el hospital Clinic de Barcelona por un brazo robótico que dirige una cámara teleoperada que opera a través de la pantalla de Palma de Mallorca, a unos 250 kilómetros del centro hospitalario. La intervención, similar a la practicada en París —aunque más a distancia—, se realizó en el momento de la presencia de una parálisis —a hipertensión de distancia— que

se practicó en el momento, y significa un importante avance en la aplicación de las técnicas de robótica a la cirugía vascular de la medicina.

El hospital Clinic de Barcelona se había preparado la experiencia que se realizará en el momento de la intervención, supervisada por la Fundación San Brazeo, presidida por el doctor Rosendo, entidad que financió la intervención desde la que se hizo a saber la operación.

El doctor Enrique Ferrer, jefe de Neurocirugía del Clinic, coordinó la intervención del brazo robótico desde el barco.

Por "razones técnicas", según explicó Ferrer, la primera intervención, así como la operación de cierre de la herida, se realizó con los cirujanos que se hallaban en la sala de operaciones del Clinic. El tipo de la intervención, sin embargo, corre a cargo del equipo instalado en Palma de Mallorca, que mediante sistema de videoconferencia, pudo establecer comunicación visual y verbal permanente y a través del cual los cirujanos que se operaban junto al paciente. La operación practicada, que duró tres cuartos de hora y se realizó con éxito, según indicó ayer Ferrer,

consistió en la denominada ventriculostomía cistococcigea percutánea. El director del hospital aseguró ayer que la utilización de la robótica en este tipo de intervención reduce "los riesgos que comporta la cirugía realizada de manera convencional". Ferrer añadió que mediante la aplicación robótica a la cirugía "se reduce el riesgo de infección y el tiempo de recuperación del paciente". En total, participó en la experiencia más de 40 médicos. Ferrer indicó que al cierre de la operación se "desarrolló, pero asumió".



Cirugía robotizada

Como se muestra en este video, el impacto que ha alcanzado la robótica se observa en todos los sectores de la sociedad. El robot manipulador se ha convertido en una poderosa herramienta que puede ayudar y asistir a una persona en su proceso de rehabilitación. Para el especialista cirujano es un instrumento quirúrgico imprescindible de alta precisión para llevar a cabo operaciones complicadas y de alto riesgo.

Figura 1.4 Robots en operaciones quirúrgicas de alto riesgo.

Otra de las aplicaciones donde tiene gran demanda la robótica es en la realidad virtual, ya que se desarrollan brazos mecánicos con interfaz adecuada que incluye programación, sistemas de visión, diseño electrónico y sensores con la finalidad de llevar imágenes al cerebro de un ambiente conocido y modelado para poder interactuar con él como en la vida real. La figura 1.5 presenta algunos ejemplos de la robótica en aplicaciones de realidad virtual.

Reyes Cortés, Fernando. Robótica: control de robots manipuladores. : Alfaomega Grupo Editor, . p 40 http://site.ebrary.com/id/10741037?ppg=40 Copyright © Alfaomega Grupo Editor. . All rights reserved. May not be reproduced in any form without permission from the publisher, except fair uses permitted under U.S. or applicable copyright law.

La realidad virtual proporciona un excelente medio de simulación que reproduce fielmente los fenómenos físicos que se encuentran presentes en los sistemas dinámicos complejos, y puede recrear situaciones extremas de peligro donde el operador deberá tomar decisiones importantes. Es importante destacar que la realidad virtual no es un simple sistema de animación, por el contrario es un sofisticado simulador ya que el modelado es realizado por medio de sistemas dinámicos que incorporan las características y detalles del ambiente.

Actualmente, la realidad virtual representa el método más importante para entrenar y capacitar a conductores de automóviles, motocicletas, pilotos de aeronaves (simuladores de vuelo), astronautas, cirujanos, etc. En nuestros días, la realidad virtual ha llegado a los video juegos, donde los niños jugando aprenden no sólo a ejercitar la mente sino también su sistema locomotor en la medida en que se incorporan ejercicio físico a sus rutinas, de esta forma la realidad virtual es una herramienta mucha más completa y adecuada, ideal para fisioterapia y rehabilitación de lesiones en músculos y tejidos.

Por otro lado, los robots pueden ser operados por movimientos de usuarios que se encuentran “conectados” a un ambiente simulado por realidad virtual tal y como se muestra en la figura 1.5.



Figura 1.5 La robótica tiene amplias aplicaciones en realidad virtual.

1.2 Tipos de robots

Actualmente existe una gran variedad de robots con diversas estructuras geométricas y mecánicas que definen su funcionalidad y aplicación. Sin embargo, de manera general pueden ser clasificados como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Tipos de robots.

Clasificación de robots		
Móviles	Terrestres: ruedas, patas	
	Submarinos, aéreo-espaciales	
Humanoides	Diseño complejo	
Industriales	Brazos mecánicos	Robots manipuladores

A continuación se da una breve descripción de cada tipo de robot clasificado en la tabla anterior.



1.2.1 Robots móviles

Los robots móviles pueden ser clasificados de acuerdo con el medio en el que se desplazan: terrestres, marinos y aéreos. Los terrestres generalmente se desplazan mediante ruedas o patas; tienen aplicaciones en rastreo y traslado de objetos, evasión de obstáculos, traslado de instrumental quirúrgico en hospitales, limpieza del área del hogar, ambientes cooperativos y en la industria donde se emplean para análisis e inspección de fisuras en gaseoductos y contenedores de petróleo, por ejemplo. Otra clase de robots móviles como AIBO de Sony son los tipo mascota (robots perros y gatos) diseñados para ser versátiles en sus movimientos (ver figura 1.6).

Los robots móviles marinos son robots submarinos equipados con sensores especiales para navegación dentro del agua como sonar, radar, visión



Robots móviles

Los robots móviles se utilizan en el hogar para limpiar y recolectar basura; en hospitales se emplean para trasladar instrumental de quirófano al área de desinfectado; en investigación científica del espacio (en la luna o en planetas) se ocupan para analizar y enviar información de piedras, arenas y atmósfera; en arqueología son empleados para enviar señales de video del interior de cavernas, túneles, pirámides, etc. Existen diversos tipos de robots móviles, dependiendo de su aplicación es el tipo de estructura mecánica, ruedas o patas.



Figura 1.6 Robots móviles.

telescópica, giroscopio, además poseen sistemas electrónicos complejos que les permiten sumergirse y/o elevarse. Los robots aéreos son aeronaves no tripuladas como helicópteros o pequeños aviones operados a control remoto, pueden proporcionar imágenes aéreas para reconocimiento de terreno y superficie, y son muy útiles en problemas de análisis de tráfico e inspección de edificios.



1.2.2 Robots humanoides

El campo de la robótica incluye el desarrollo de robots humanoides, también conocidos como androides, los cuales son máquinas antropomórficas capaces de imitar las funciones básicas del ser humano tales como caminar, hablar, ver, recolectar, limpiar y trasladar objetos. En la figura 1.7 se muestran algunos prototipos de humanoides científicos, como es el caso del robot pianista *Don Cuco el Guapo* de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Con estas características, los robots humanoides pueden llevar a cabo funciones similares a las de un mayordomo como los describe Karel Čapek en su novela satírica *Rossum's Universal Robots* la cual fue la base de la película *Yo, robot*. En un futuro cercano, con el avance de la tecnología los robots humanoides, más que ser máquinas mul-

tifuncionales, intentarán inspirar y comunicar emociones como se plantea en la película *El hombre bicentenario*.

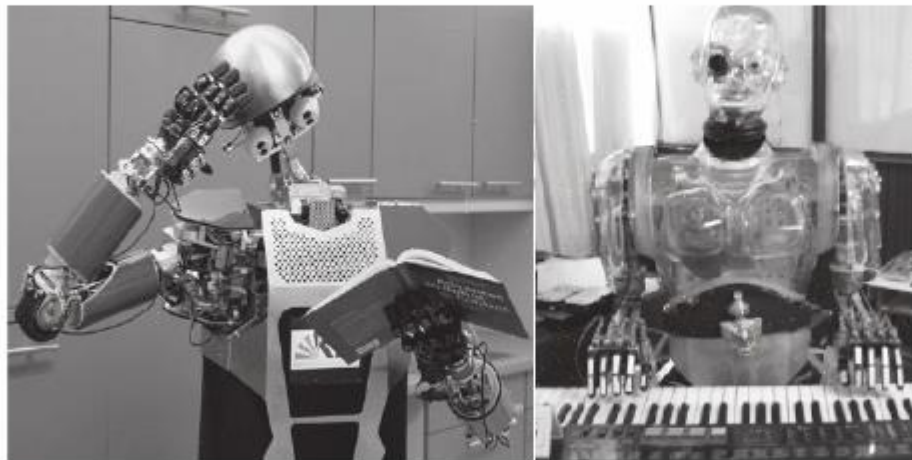


Figura 1.7 Robots humanoides: PACO-PLUS y Don Cuco el Guapo.

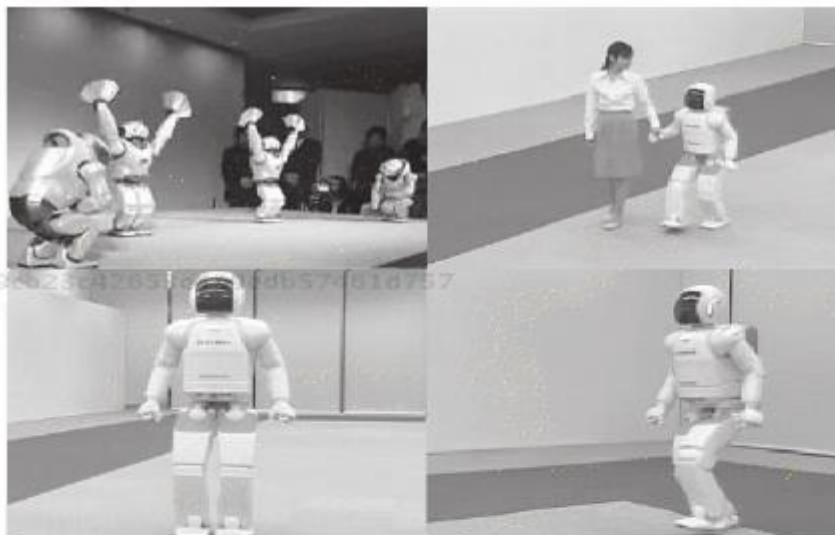


Figura 1.8 Robots Androides: ASIMO.

Los androides actuales poseen la capacidad de realizar actividades complicadas, por ejemplo, ejecutar actividades de danza, alcanzar velocidades de 6 km/hora (robot ASIMO *Advanced Step in Innovative Mobility*), y más aún, el principal potencial del androide es que puede ser empleado en



Robots humanoides

Los robots humanoides, conocidos como androides, son sistemas muy complejos no sólo en su estructura mecánica, también lo son en lo relacionado con la electrónica, los sensores, los servomotores, la programación y el modelado matemático. Los robots humanoides ocupan una posición muy importante en todo el mundo debido a su versatilidad y aplicaciones; un aspecto clave para tal aceptación en la sociedad es su similitud al ser humano que los hace ver agradables, confiables y amigables. Actualmente, los robots humanoides pueden alcanzar velocidades de 6 km/h y pueden guiar a personas invidentes. Además de realizar actividades domésticas, también son empleados en siniestros o derrumbes como terremotos o desastres naturales.

auxiliar a personas en zonas de desastres, es decir, buscar víctimas atrapadas en lugares donde hay derrumbes, llevarles agua, inclusive rescatar y salvar vidas. Actualmente el aspecto de los robots androides es mucho más humano, lo que los hace más amigables. Un androide puede asistir a personas discapacitadas, puede guiar a personas invidentes, los ayuda a trasladarse a diversos sitios, también puede orientar a las personas y comunicar órdenes. En la figura 1.8 se muestran algunos ejemplos de actividades que pueden llevar a cabo los robots androides.



Robots industriales

Las principales aplicaciones de los robots industriales se encuentran en fundidoras, fábricas ensambladoras automotrices, empresas textiles, procesos de soldadura de arco y de punto, corte de materiales por láser, traslado y pintado de objetos, estibado de cajas, ensamble de productos electrónicos y mecánicos, inspección y prueba de calidad del producto, mantenimiento y reparación de camiones de carga, pulido y esmerilado de vidrio, traslado de desechos tóxicos, prueba y desempeño de automóviles, industria del zapato y vestido, etc.



1.2.3 Robots industriales

Los robots industriales son el tipo de robots más populares, debido a la importancia que ocupan en el sector industrial como herramientas clave para la modernización de las empresas. Hoy en día, la automatización de procesos industriales es realizada a través de robots y esto trae como consecuencia competitividad, productividad, eficiencia y rentabilidad de las empresas.

Los robots industriales también son conocidos como brazos robots o brazos mecánicos, por analogía con el brazo humano, y se componen de la base la cual puede rotar 360° grados alrededor de su eje de giro, además de que poseen articulaciones para hombro y codo. En el extremo final del codo tienen una parte mecánica denominada muñeca que le permite orientar a la herramienta final que es la que determina la aplicación a realizar. En la figura 1.9 se muestra un robot industrial de la compañía ABB para aplicaciones de traslado de cajas o estibado; un ejemplar de esta naturaleza tiene un peso aproximado de 3 toneladas, puede alcanzar una altura de 4 metros y velocidad de movimiento de 3000 mm/seg. Dentro de las características de los robots industriales se encuentra el que trabajan sin descansar las 24 horas del día, todos los días del año, por lo que en aplicaciones industriales superan en desempeño a las personas, ya que los robots no se fatigan ni se cansan, y tienen la habilidad de repetir el proceso siempre con el mismo tiempo y la misma calidad (repetitividad).

Robot Industrial: oficialmente la *ISO (International Organization for Standardization)* lo define como un manipulador multipropósitos, reprogramable y controlado automáticamente en tres o más ejes.



Figura 1.9 Robot industrial de la compañía ABB.

Entre las compañías más importantes que diseñan y construyen robots industriales se encuentran FANUC, ABB, KUKA, MOTOMAN, EPSON; cuentan con una gran diversidad de modelos de robots para diferentes aplicaciones industriales. En la figura 1.10 se muestran algunos ejemplos de robots industriales para procesos de pintura y soldadura.

Las principales aplicaciones que tienen los robots industriales son proceso de pintado de carrocerías automotrices, accesorios, cubetas, tinas, cajas, soldadura de punto y por arco en carrocerías automotrices, puertas y diversas piezas industriales; traslado de herramientas, estibado y empaquetado de materiales, etc. En las figuras 1.11 y 1.12 se muestran ejemplos de aplicaciones industriales.

En forma general, un robot industrial está formado por los siguientes

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Industrias robotizadas

Todas las industrias importantes del mundo tienen automatizadas sus líneas de producción mediante robots manipuladores. Comparadas con los robots, en actividades rutinarias las personas tienen la desventaja de la fatiga o cansancio por lo que la productividad y rentabilidad de la empresa así como la calidad del producto se ven comprometidas. En contraste, una característica de los robots es que pueden realizar las cosas con repetitividad, siempre con la misma calidad y en tiempos óptimos todos los días del año. Por eso, los robots manipuladores son parte clave de la modernización industrial.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary
ALFAOMEGA

ALFAOMEGA



Figura 1.10 Robots industriales en aplicaciones de pintura y soldadura.

elementos descritos brevemente:



Articulaciones o *uniones* formadas por servomotores que permiten la conexión y movimiento relativo entre dos eslabones consecutivos del robot. Dependiendo del tipo de movimiento que produzcan las articulaciones del robot pueden ser de tipo *rotacional* o *lineal*. Las articulaciones de tipo *lineal* también son conocidas como *prismáticas*. Las unidades de medición que se asocian a una articulación de tipo rotacional están dadas en radianes o grados, mientras que para una articulación de tipo lineal generalmente se encuentran en metros.



Actuadores: suministran las señales necesarias a las articulaciones para producir movimiento. Los actuadores empleados en robótica pueden ser servomotores, elementos neumáticos, eléctricos o hidráulicos.



Sensores: proporcionan información del estado interno del robot. Posición y velocidad articular son las variables más comunes en el



Figura 1.11 Robots industriales en procesos automotrices.

sistema de sensores. En aplicaciones específicas, se emplean sensores de fuerza para conocer la interacción con el medio ambiente, cámaras de videos para localizar objetos en el espacio de trabajo. La capacidad de percepción del robot es mejorada a través del sistema de **sensores** que le permite responder a su entorno de manera versátil y autónoma. En robótica son de particular interés los *encoders ópticos*, ya que éstos proporcionan información del desplazamiento articular (ver figura 1.13). En general los encoders ópticos consisten de una fuente de luz (emisor) que incide directamente sobre el lado frontal de un disco o plato con ranuras transparentes, colocado directamente en el rotor del motor que al girar permite el paso de ciertos rayos de luz, el detector de luz (receptor) registra los rayos infrarrojos que han pasado por las ranuras del disco, esta señal de luz es acoplada a un circuito electrónico para generar



Componentes de un robot

En la página web del libro se presenta información adicional acerca de las componentes que configuran un robot manipulador: artículos científicos, reportes técnicos, especificaciones eléctricas, manuales de servomotores, eslabones, programación del robot, fotografías, fabricantes y videos de varios tipos de actuadores (eléctricos, neumáticos e hidráulicos); sensores de posición analógicos y digitales, sensores de fuerza, presión, garras mecánicas, consolas de control, teach pendant, partes del sistema mecánico, drivers o amplificadores de potencia, diseño y evaluación experimental de algoritmos de control, simuladores, código fuente, etc.

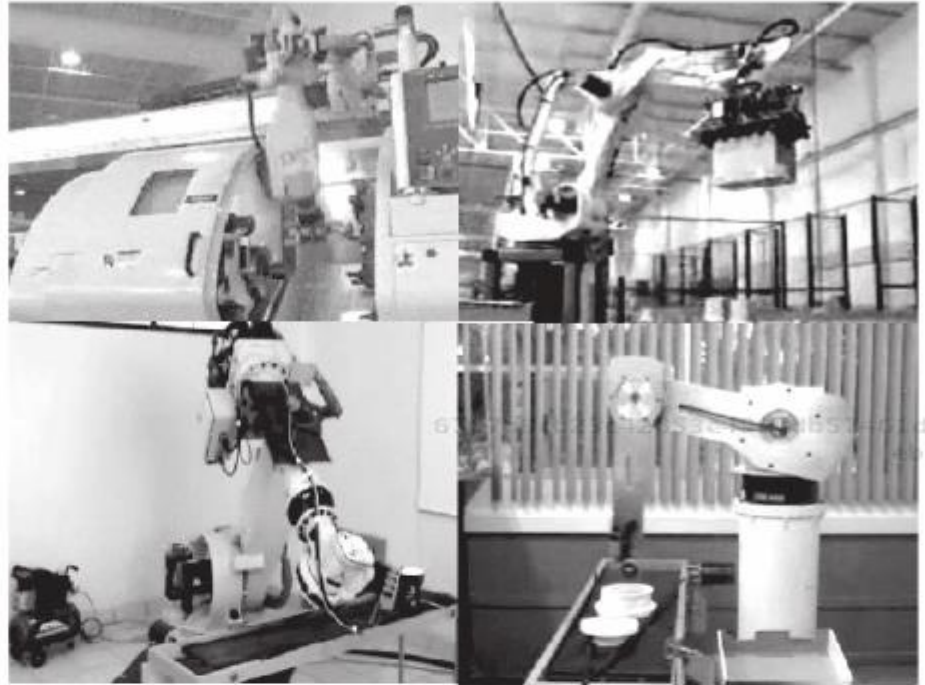


Figura 1.12 Robots industriales.

pulsos de salida proporcional al ángulo de rotación. En la práctica, un arreglo de diodos LED son usados como fuente de luz infrarroja a través de un disco con ranuras guiándola a un dispositivo fotosensible (receptor de luz, por ejemplo un fototransistor), esta señal de luz es procesada por un comparador electrónico para obtener una onda rectangular estable la cual representa el desplazamiento proporcional que tienen las articulaciones del robot.



Sistema mecánico: consiste en una secuencia de eslabones rígidos de metal conectados en cadena abierta por medio de articulaciones (*servomotores*); un robot manipulador está caracterizado por un brazo que asegura la movilidad, una muñeca que confiere la destreza y un extremo final que realiza la tarea programada al robot.



Consola de control: se compone de un sistema electrónico con la etapa de potencia encargada de suministrar energía al robot para su movimiento. Incluye un dispositivo portátil llamado *teach pendant*

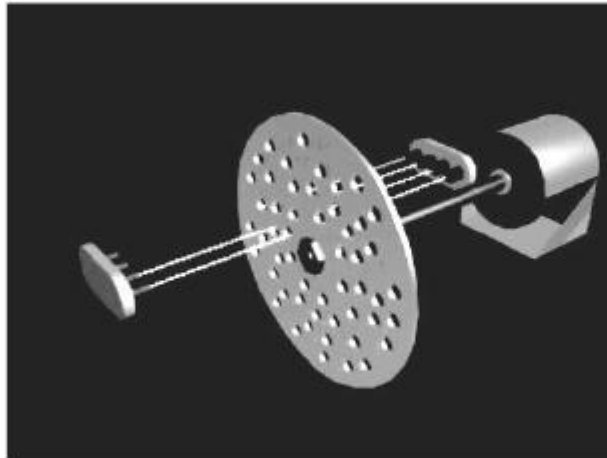


Figura 1.13 Encoder óptico.

el cual brinda la interfaz necesaria para que el usuario se comunique con el robot a través de instrucciones de programación. La consola de control también incluye los algoritmos de control programados en el sistema operativo del robot para guiar al robot. La capacidad del robot para llevar a cabo la tarea asignada con alto desempeño está dada por el algoritmo de control, el cual puede decidir la ejecución de la acción con respecto a las restricciones impuestas por el sistema mecánico y el medio ambiente.

1.3 Control de robots manipuladores

A pesar de que los robots industriales son capaces de realizar correctamente una gran variedad de actividades, a simple vista parecería innecesario desarrollar investigación sobre el tema de control de robots. Sin embargo, es importante resaltar que en aplicaciones específicas es indispensable contar con el modelo dinámico del robot manipulador así como tener una adecuada estructura matemática de control de alto desempeño práctico para no saturar los actuadores del robot y realizar con exactitud la tarea encomendada al robot. De ahí que el diseño de controladores sigue siendo un área de intensa investigación por parte de universidades.

Control automático

El control automático de robots manipuladores involucra matemáticas, dinámica no lineal, sensores para retroalimentar la posición de movimiento y técnicas de control de diseño para algoritmos de control. Los conceptos de control clásico Nyquist, Bode, root locus son términos específicos de sistemas lineales y por lo tanto no se pueden aplicar a los robots manipuladores, debido a que son sistemas dinámicos no lineales.

Como parte de las técnicas de análisis y diseño de sistemas no lineales en particular se tiene la teoría de estabilidad de Lyapunov, la cual es una herramienta adecuada que permite generar una metodología de diseño que produce una familia extensa de algoritmos de control, en especial moldeo de energía es una técnica de control moderna que emplea todo el rigor matemático para diseñar una variedad infinita de nuevos esquemas de control. En general, el desempeño de estos algoritmos de control superan al esquema clásico de control proporcional derivativo PD.

centros de investigación y fabricantes de robots.

El diseño de controladores ofrece grandes retos teóricos que resuelven substancialmente problemas de origen práctico, más aún, su estudio resulta indispensable en aquellas aplicaciones que no pueden realizarse por medio de los robots comerciales. Existen diversas técnicas de diseño de estrategias de control, entre ellas el **Moldeo de Energía** es una metodología moderna que se basa en moldear una función de energía potencial dependiente del error de posición e incluye un término con inyección de amortiguamiento o freno mecánico usando la velocidad articular. El objetivo de control es lograr que $\lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{q}^T(t), \dot{\tilde{q}}^T(t)]^T = \mathbf{0}$, donde la velocidad de movimiento del robot es denotada por el vector \dot{q} , el vector de errores de posicionamiento es $\tilde{q} = q_d - q$; el algoritmo de control se encarga de llevar en forma asintótica a cero, q_d representa el vector de posiciones deseadas donde el usuario quiere colocar al robot, q es el vector de la posición actual del robot, τ es el vector de par aplicado y representa la entrada al robot, siendo la energía aplicada a cada una de las articulaciones para que el robot se pueda mover desde su posición inicial a la posición deseada. La figura 1.14 muestra el diagrama a bloques para un sistema de control de posicionamiento de robots industriales.

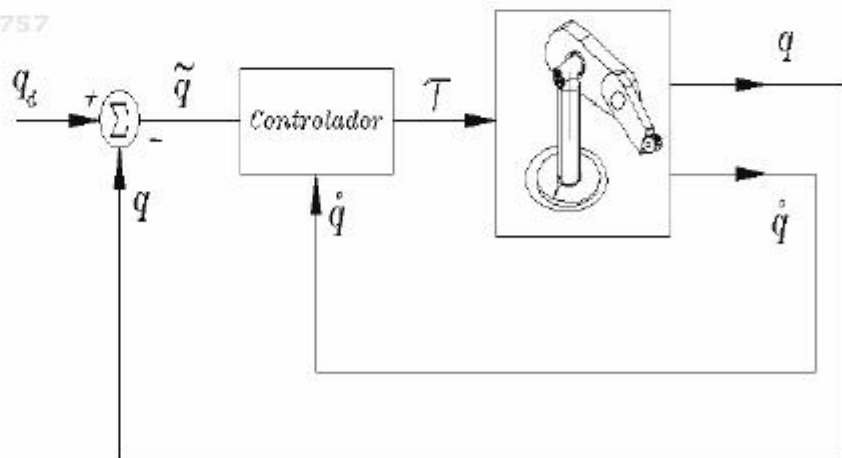


Figura 1.14 Sistema de Control.

1.4 Tecnología de robots

Para que los objetivos de control se cumplan es necesario analizar y estudiar los fenómenos dinámicos que intervienen en el sistema mecánico del robot manipulador, por otro lado la estructura teórica que explica la física del robot es el modelo dinámico y está formado por una ecuación diferencial no lineal que se obtiene de las leyes de la física usando las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange.

El control de posición de robots manipuladores es el más simple de los problemas de control, y el control de trayectoria es cuando el robot se encuentra controlado en posición y velocidad simultáneamente. También se pueden usar sensores externos para realizar control de fuerza, control de impedancia y control mediante información visual (*visual servoing*).

1.4 Tecnología de robots



Una forma de clasificar a los robots manipuladores es a través de la tecnología y construcción de sus articulaciones y eslabones, por ejemplo clasificarlos como *robots tradicionales*, fabricados con *engranes y reductores*, y robots de *transmisión directa* (*direct drive robot*). Los robots tradicionales emplean engranes para amplificar la capacidad limitada de par en sus motores y reducir la velocidad rotacional de los mismos (ver figura 1.15). Como desventaja, el sistema de engranes produce fenómenos de elasticidad en las uniones e introduce fenómenos de fricción. Esta situación representa el principal inconveniente de los sistemas de engranaje, el cual es un fenómeno disipativo, esto es, convierte la energía mecánica en energía térmica, degradando las partes mecánicas de los engranes lo cual repercute en errores de posicionamiento y envejecimiento paulatino del robot. Los pares de fricción pueden ser de considerable magnitud como para predominar sobre la dinámica del manipulador. Por ejemplo, la cantidad de fricción presente en el robot PUMA 600 puede llegar al 45 % del par máximo aplicado al motor.

En la figura 1.16 se muestra el robot PUMA-200 (*Programmable Univer-*



Sistema de engranes

Los sistemas de engranaje desempeñan una función muy importante en la construcción y diseño de robots manipuladores. Sin embargo, es importante recalcar que estos sistemas aumentan notablemente el fenómeno de fricción y juego mecánico o *cascajeo*, en este sentido la tecnología de transmisión directa ofrece enormes ventajas. En la página web del libro se presenta información técnica de sistemas de engranaje, clasificación, hojas de especificaciones, fórmulas de ingeniería, reductores de velocidad y amplificación del par, tipos de materiales, detalles de construcción y diseño, formas de acoplamiento con el rotor del motor así como videos de sistemas de engranes con diversas aplicaciones.

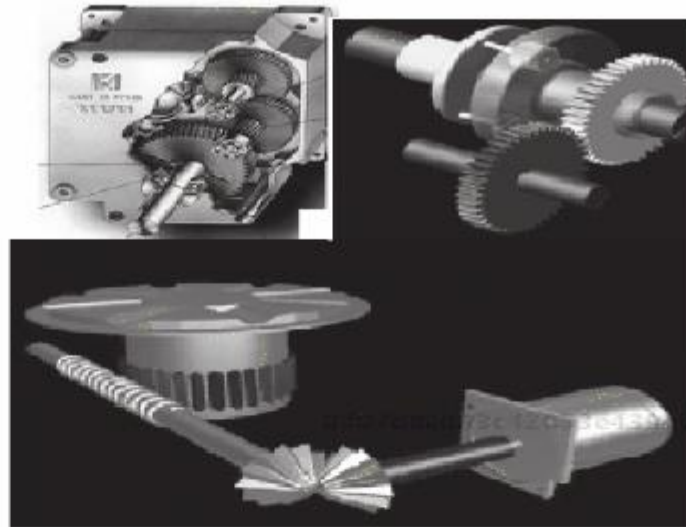


Figura 1.15 Motor con sistema de reducción.

sal Machine for Assembly o Programmable Universal Manipulation Arm) de la empresa pionera en robótica *Unimation*. El sistema mecánico de este robot está formado por sistemas de engranaje produciendo cascajeo o juego mecánico en el movimiento del robot. Además, es mucho más complejo caracterizar los parámetros del modelo dinámico, es decir encontrar los valores numéricos de los momentos de inercia, centros de masa, coeficientes de gravedad, etc.

Otro tipo de tecnología para robots manipuladores es la denominada *transmisión directa* (*direct drive*), la cual constituye la nueva generación de robots cuya tecnología irá desplazando paulatinamente a los robots tradicionales. Transmisión directa significa que el servomotor funciona como una fuente ideal de par, no hay pérdidas de energía como sucede en los sistemas de engranaje. *Direct drive* elimina el sistema de engranaje tradicional, de ahí que el rotor del motor está directamente acoplado al eslabón. En este tipo de motores desaparece la flecha y el rotor es parte de la carcasa que gira con respecto al estator el cual permanece estático. La tecnología de transmisión directa elimina el cascajeo o falta de movimiento y reduce significativamente el fenómeno de

fricción comparada con los robots convencionales; la fricción no se elimina completamente, su magnitud se reduce debido a que el motor no tiene escobillas (*brushless*). Por otra parte, los materiales de construcción hacen que el rotor y el estator se encuentren levitando entre sí. Además, la construcción mecánica del robot es mucho más simple y la exactitud en el posicionamiento del extremo final del robot es mejorada. Una característica importante de la tecnología de transmisión directa es que la electrónica asociada al motor lo hace funcionar como *fente ideal de par aplicado*, lo cual significa que independientemente de la carga mecánica mantiene constante el *par* solicitado en cada periodo de muestreo. Sin embargo, en la práctica está restringido por los límites físicos en los servo actuadores.



Figura 1.16 Sistema de engranaje del robot PUMA-200 de la empresa Unimation.

En la figura 1.17 se muestra un robot prototipo de transmisión directa de 3 grados de libertad diseñado y construido de manera específica para realizar investigación científica en robótica. Dicho prototipo fue construido en 1998 en el Laboratorio de Robótica de la Facultad de Ciencias de la Electrónica, de la *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*.

Otro ejemplo de robot de transmisión directa es el robot IMI de 2 grados de libertad que se muestra en la figura 1.18.

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS



Servomotores de transmisión directa

Los servomotores ofrecen considerables ventajas para el diseño y construcción de robots manipuladores, en particular funcionan como fuente de par aceptando una señal analógica de voltaje que es convertida a par. El fenómeno de fricción es muy bajo, debido a que desaparece el sistema de engranaje. Típicamente para un motor de transmisión directa la fricción alcanza una magnitud menor al 5% de la capacidad máxima del servomotor, si la velocidad de movimiento está en su ancho de banda. Una importante ventaja para investigación es que los servomotores de transmisión directa funcionan en arquitectura abierta, permitiendo la evaluación práctica de cualquier esquema de control. Además, el sensor de posición (*encoder*) es de alta resolución, por ejemplo 4,096,000 pulsos por cada 360 grados.

En la página web del libro se presentan especificaciones técnicas acerca de servo motores de transmisión directa.



Figura 1.17 Robot de transmisión directa de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

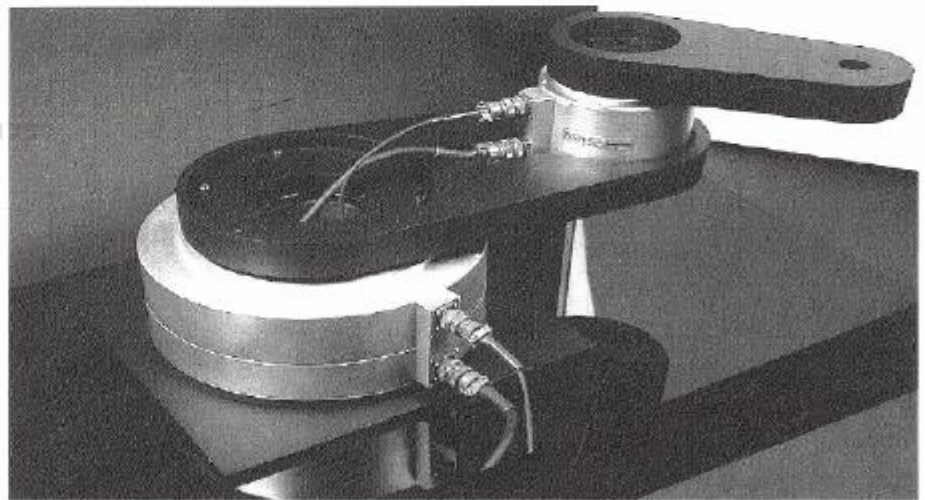


Figura 1.18 Robot IMI de transmisión directa.

1.5 Estadísticas de robótica

Cada vez es mayor el número de robots industriales que se usan en las empresas de todo el mundo, en particular las líneas de producción están automatizadas mediante robots manipuladores. En la tabla 1.3 (fuente: *International Federation of Robotics Statistical Department*) se muestran estadísticas sobre el uso de robots en el mundo. Desde el año 2000 se ha dado una tasa anual de crecimiento sistemático de 25,000 robots, y los principales países usuarios de robots son Estados Unidos, Japón, Alemania, Italia, Francia y China. Para el año 2008 se encontraban operando en todo el mundo más de un millón de robots industriales.

Tabla 1.2 Países usuarios de robots industriales.

Unidades de robots instalados en las industrias				
Continente	Instalaciones anuales		Robots en operación	
	2008	2009	2008	2009
América	17,192	9,600	173,977	172,800
Canadá, México, USA	16242	9000	168,489	166,800
América Central y Sudamérica	950	600	5,488	6000
Asia/Australia	60,294	35,900	514,914	509,00
China	7,879	5,000	31,787	36,800
India	883	500	3,716	4,200
Japón	33,138	18,000	355,562	339,800
República de Corea	11,572	8,100	76,923	79,300
Taiwán	3,359		23,644	
Tailandia	1,585		6,411	
Otros lugares de Asia	1,041	4,300	10,157	48,900
Australia/Nueva Zelandia	837		6,714	
Europa	35,066	22,600	343,700	346,100
Benelux	1,333		11,124	
Francia	2,605	1,800	34,370	34,400
Alemania	15,248	10,000	144,803	145,800
Italia	4,793	3,500	63,051	62,900
España	2,296	1,500	28,636	27,400
Suecia	1,100		9,426	
Reino Unido	909	600	28,636	27,400
Europa Central y del Este	2,603		9,207	
Otros lugares de Europa	4,179	5,200	27,950	62,300
Africa	461	300	1,784	1,800
Total	113,345	68,400	1,035,674	1,031,000

Tabla 1.3 Países usuarios de robots industriales.

Unidades de robots instalados en las industrias				
Continente	Instalaciones anuales		Robots en operación	
	2008	2009	2008	2009
América	17,192	9,600	173,977	172,800
Canadá, México, USA	16242	9000	168,489	166,800
América Central y Sudamérica	950	600	5,488	6000
Asia/Australia	60,294	35,900	514,914	509,00
China	7,879	5,000	31,787	36,800
India	883	500	3,716	4,200
Japón	33,138	18,000	355,562	339,800
República de Corea	11,572	8,100	76,923	79,300
Taiwán	3,359		23,644	
Tailandia	1,585		6,411	
Otros lugares de Asia	1,041	4,300	10,157	48,900
Australia/Nueva Zelanda	837		6,714	
Europa	35,066	22,600	343,700	346,100
Benelux	1,333		11,124	
Francia	2,605	1,800	34,370	34,400
Alemania	15,248	10,000	144,803	145,800
Italia	4,793	3,500	63,051	62,900
España	2,296	1,500	28,636	27,400
Suecia	1,100		9,426	
Reino Unido	909	600	28,636	27,400
Europa Central y del Este	2,603		9,207	
Otros lugares de Europa	4,179	5,200	27,950	62,300
Africa	461	300	1,784	1,800
Total	113,345	68,400	1,035,674	1,031,000

6707b9cb23c42653e439edb57461d757

ebrary

En la figura 1.19 se muestra el desarrollo histórico de uso de robots manipuladores en la industria desde los años 1991 al 2008. Obsérvese que en el periodo del 2001 al 2005 se incrementó en 20% año con año el uso de robots en las industrias, durante los años 2006 al 2007 el incremento fue menor del 3%, en 2008 prácticamente se detuvo la inversión en robótica, debido a la crisis financiera, la cual llevó a una crisis global económica. El parque de robots manipuladores instalados en diversas empresas en 2008 llegó aproximadamente a 113,300 unidades (fuente: *International Federation of Robotics Statistical Department*).

En la figura 1.20 se muestra para el año 2008 el número de robots empleados para aplicaciones específicas de la industria. Más de 22.000 unidades

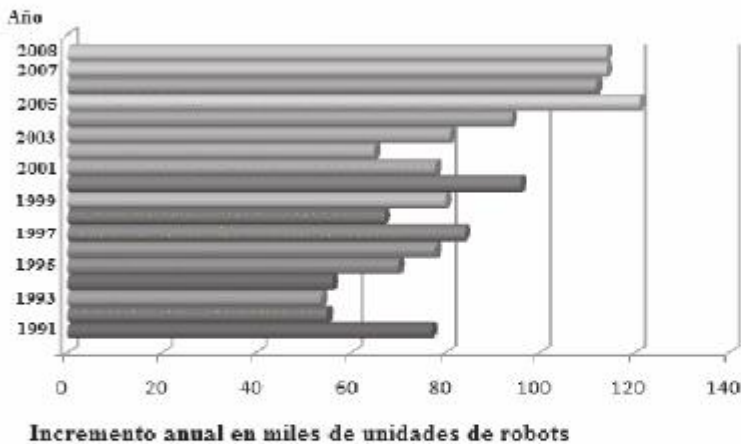
6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Figura 1.19 Estadísticas de robots usados en el mundo por año.

se han empleado en fabricación y ensamble de motores automotrices, y aproximadamente 20,000 unidades para fabricación de diversas partes de la industria automotriz. Maquinaria eléctrica, productos plásticos y químicos, y procesos metalúrgicos son de las aplicaciones donde se demanda el empleo de robots manipuladores.

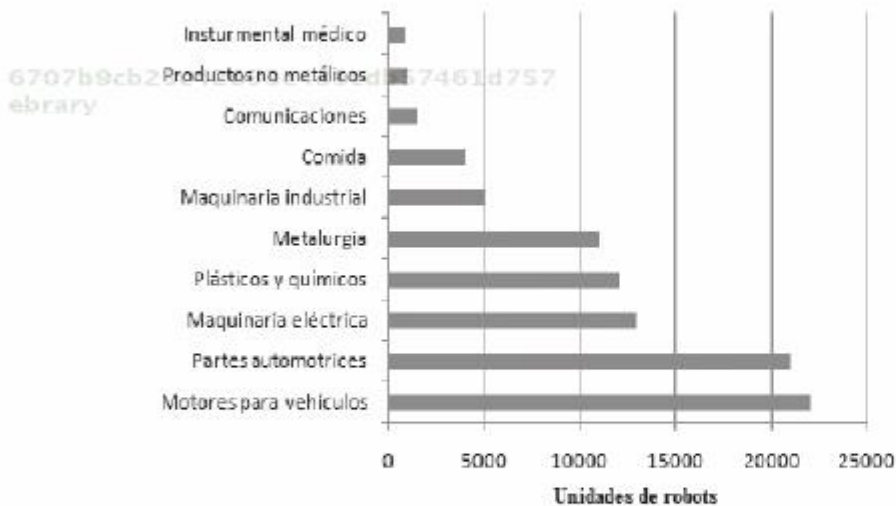
6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Figura 1.20 Robots aplicados en la industria durante el año 2008.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Leonardo da Vinci (1452-1519)



Leonardo nació el 15 de abril de 1452 en Vinci, región de la Toscana, cercano a Florencia y Pisa. Su padre Ser Piero tenía 25 años de edad y provenía de una familia de notarios de aquella localidad. Su madre Catalina nunca se casó con Ser Piero. Leonardo desde pequeño vivió en la casa de su abuelo paterno, donde también vivía su padre con su primera mujer. A la edad de 13 años se fue a vivir con su padre a Florencia. La educación de Leonardo fue con influencia renacentista y permaneció en Florencia de 1465 a 1482. Radicó en Milán de 1482 a 1499 donde trabajó con Ludovico el Moro, realizó varias obras entre las que destaca *La Última Cena* que se encuentra en la iglesia de Santa María delle Grazie. Regresó a Florencia de 1500 a 1508 donde terminó la pintura de *La Gioconda o Monna Lisa*. Retornó a Milán en 1508, y en esta época se dedicó cada vez menos a la pintura, siendo su ocupación principal realizar dibujos anatómicos y disección de cuerpos humanos. Leonardo da Vinci realizó una cantidad enorme de prototipos mecánicos de riqueza invaluable para la ingeniería. Murió el 2 de mayo de 1519 y es considerado uno de los más grandes genios que ha dado la humanidad.

ALFAOMEGA



1.6 Historia de la robótica

El desarrollo de los sistemas mecánicos tuvo una notable influencia de Leonardo da Vinci, quien fue conocido principalmente por sus actividades de pintura con las que subsistía. Además de esta actividad, Leonardo se desempeñó como científico, ingeniero, médico, escultor, músico y filósofo. Su personalidad polifacética siempre lo llevó a estudiar y entender la naturaleza, fueron sus principales características diseñar, innovar y perfeccionar. En el aspecto de ciencia e ingeniería diseñó una multitud de prototipos mecánicos para diversas aplicaciones y de gran utilidad para la ciudad de Florencia, donde pasó varios años de su vida, por ejemplo diseñó puertas semiautomáticas que con contrapesos y poleas podían abrir y cerrar sin necesidad de ser operadas por una persona.

Reproducciones fabricadas en madera de varios de los diseños de Leonardo pueden apreciarse en el *Museo Leonardo da Vinci* de la ciudad de Florencia, Italia, donde se presenta permanentemente la muestra de prototipos "*Le Grandi Macchine Funzionanti*" (ver figura 1.21).

Entre sus interesantes diseños se encuentra un sistema para cortar madera ("*sierra mecánica*"). Llegó a desarrollar puentes para ríos, que eran fácilmente desarmables y podrían soportar una cantidad sorprendente de personas. Máquinas para navegar en ríos y en mar abierto con avanzados sistemas de propulsión que aprovechaban al máximo las corrientes de viento, así como sistemas mecánicos rotacionales para recolectar agua y sistemas con espirales que podían transportar agua de abajo hacia arriba (ver figura 1.22).

En los tiempos de Leonardo, la ciudad de Florencia estaba amurallada debido a que era constantemente atacada por los galos. Leonardo diseñó ingeniosos sistemas mecánicos para la guerra y así contribuyó a defender la ciudad; por ejemplo, creó máquinas para lanzar piedras, catapultas, cañones anclados a una base giratoria con sistema de engranaje

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS



Figura 1.21 El Museo de Leonardo da Vinci en Florencia, contiene una importante muestra permanente de prototipos mecánicos.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757

ebrary

permitían controlar la orientación y giro para disparar. También diseñó un aparato aéreo que podía ser operado por una persona (*piloto*). El primer robot completamente articulado utilizando una armadura de caballero de guerra fue diseñado por Leonardo. Perfeccionó el sistema mecánico de la bicicleta. En la figura 1.23 se muestran algunos de los prototipos de Leonardo da Vinci.

Varios de sus diseños fueron dedicados a la música, en particular creó sistemas musicales que al desplazarse podían reproducir la melodía que él grababa en forma codificada sobre un cilindro. Un sistema ampliamente utilizado fue el sistema de engranaje para subir y bajar los portones

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS

ALFAOMEGA



Contribuciones de Leonardo

Las contribuciones de Leonardo en ciencia y tecnología son innumerables. Actualmente existe una sociedad en Florencia *Renaissance Engineers* que se encuentra recopilando, divulgando y publicando los créditos y logros de Leonardo da Vinci. Poco a poco se han estado encontrado sus notas donde describe a detalle experimentos científicos, cálculos matemáticos, planos de ingeniería, etc. Precisamente en las comunidades de Florencia y en Milán, existen varios museos donde se encuentran reconstrucciones de sus principales prototipos; estos museos son interactivos donde es posible aprender de los principios físicos y matemáticos que ocupó en sus inventos.

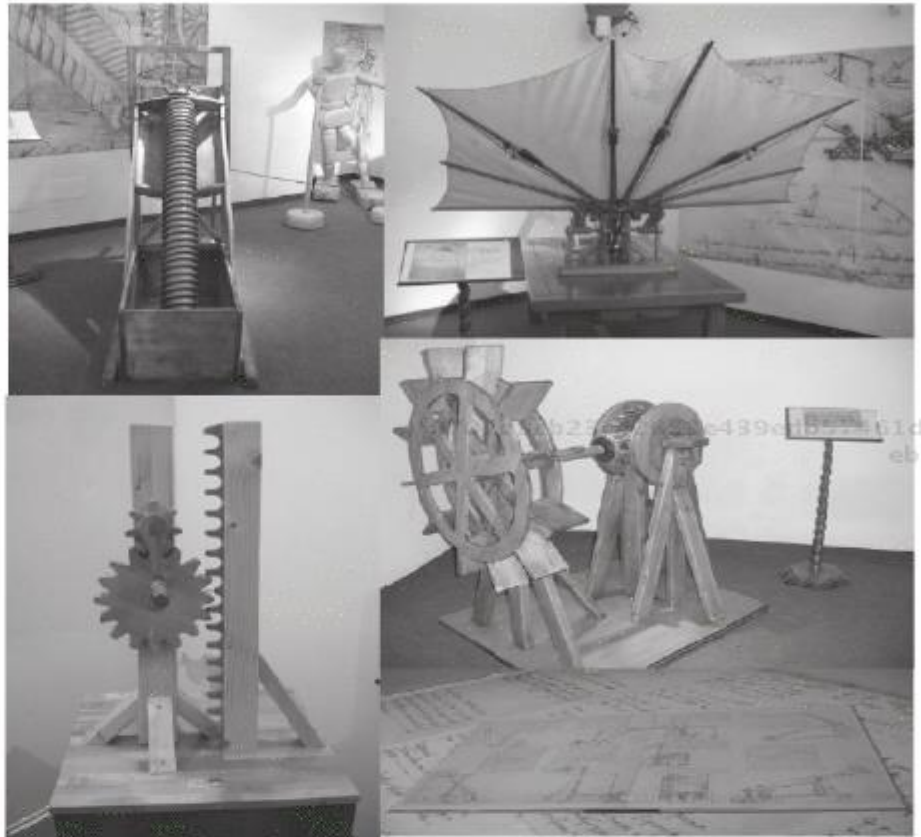


Figura 1.22 Prototipos mecánicos diseñados por Leonardo: Museo Leonardo da Vinci en Florencia.

de los castillos medievales, de hecho con una simple manivela se podían desplazar más de 20 toneladas (ver figura 1.24).

Es importante subrayar que Leonardo no construía sus diseños, eran otras personas como carpinteros, herreros y artesanos quienes en base a las instrucciones detalladas en sus notas, esquemas y planos llevaban a cabo la construcción y la puesta en operación.

Particularmente en el estudio de fenómenos físicos del robot, Leonardo da Vinci en 1519 realizó estudios de fricción y encontró que la fuerza de fricción es proporcional a la carga, se opone al movimiento y es indepen-

7b9cb23c42653e439edb57461d757
ebruary

Figura 1.23 Prototipos mecánicos de guerra y el primer robot articulado diseñado por Leonardo: Museo Leonardo da Vinci de Florencia.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebruary

diente del área de contacto, pero este hecho permaneció escondido por muchos años. Los estudios del fenómeno de fricción de Leonardo fueron redescubiertos por Amontons en 1699 y desarrollados por Coulomb en 1785 (ver *Brian Armstrong-Hélouery, Pierre Dupont y Carlos Canudas de Wit, 1994*).

A continuación se presentan algunos acontecimientos históricos importantes en el área de la Robótica.



En la historia de la humanidad, varios siglos antes de Cristo existen registros de máquinas automatizadas empleadas en las guerras, la

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebruary

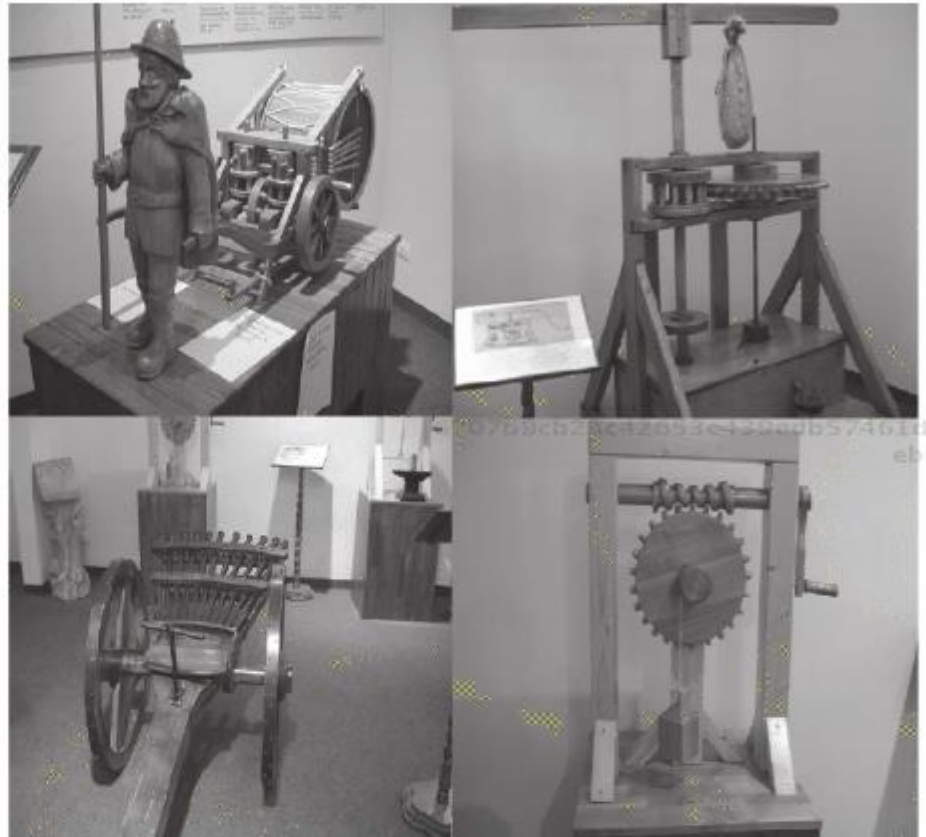


Figura 1.24 Prototipos mecánicos diseñados por Leonardo: Museo Leonardo da Vinci de Florencia.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebruary

agricultura, la construcción: catapultas, máquinas de fuego, órganos de viento, máquinas de vapor, etc.



En 1206 *Al-Jazari* desarrolló el primer robot humanoide.



Gallo de Estrasburgo. En 1352 fue desarrollado un gallo mecánico que cantaba y agitaba las alas; fue colocado en el tejado de la catedral de Estrasburgo.



El robot de Leonardo da Vinci se refiere al humanoide automatizado que realizó en el año 1495. El diseño original de éste fue encontrado en la notas de Leonardo da Vinci en 1950.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebruary



En 1738 se tiene un pato mecánico con movimientos simples, diseñado por *Jacques de Vaucanson*.

En la época contemporánea se han logrado los siguientes desarrollos:



En 1920 Karel Čapek introdujo el término robot en su novela *Russum's Universal Robots*.



Entre 1939 y 1940 se exhibió un robot humanoide llamado *Elektro* en la *Feria del Mundo* fabricado por la empresa *Westinghouse Electric Corporation*.



En la década de los cuarenta y principios de los años cincuenta se inició el desarrollo de la tecnología en robótica.



En 1954, George Devol diseñó el primer robot reprogramable. *Unimate* fue el nombre del primer robot que fue puesto en operación en 1961 en la empresa *General Motors* por el propio George Devol y Joe Engelberg. De esta forma, en poco tiempo esta empresa se convirtió en la primera compañía mundial en fabricar robots. En esta época a los robots se les denominaba *máquinas de transferencia programables*, puesto que su principal uso era transferir objetos de

6707b9cb23c42653e439edb57461d757

ebrary



un punto a otro. En 1961 Victor Scheinman en la *Universidad de Stanford* desarrolló un robot articulado de 6 ejes, conocido como *robot Stanford*.



En 1963, *Fuji Yusoki Kogyo* desarrolló el primer robot para aplicaciones de *palletizing*, cuyo nombre fue *Palletizer*.










La empresa sueca/suiza *ABB (Asea Brown Boveri)* en 1973 introdujo al mercado el primer robot (IRB6) controlado por un microprocesador.



En 1973, la empresa alemana *KUKA Robotics (KUKA Roboter GmbH)* construyó el primer robot articulado electromecánicamente de 6 ejes conocido como *FAMULUS*.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757

ebrary

-  En la década de los setenta se desarrolló notablemente el incremento de compañías de robots y algunas ya existentes emigran al campo de la robótica como *General Electric*, *General Motors* la cual se unió a *FANUC Robotics* y *FANUC LTD* de Japón. También en estos tiempos surgen compañías como *Automatix* y *Adept Technology Inc.*
-  En 1975, Victor Scheinman desarrolló el robot PUMA (*programmable universal machine for assembly* o *programmable universal manipulation arm*) de la compañía *UNIMATION* (inicialmente este robot fue desarrollado para *General Motors*). El modelo más popular fue el PUMA-650.
-  En 1981, Haruhiko Asada diseñó y construyó el primer robot de transmisión directa en la *Universidad de Carnegie-Mellon*, Pittsburgh, Pennsylvania.
-  En 1984 la compañía *UNIMATE* fue adquirida por *Westinghouse Electric Corporation* (por 107 millones de dólares) quien a su vez la vendió a *Stäubli Faverges SCA* en 1988 y posteriormente, en 2004, fue adquirida por *Bosch*.
-  En 1992 Alejandro Pedroza desarrolló en la *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla* el primer androide pianista de México *Don Cuco el Guapo*, el cual incluye servomotores, articulaciones neumáticas, sistema óptico para leer partituras; fue una aplicación del microprocesador ILA9200.
-  En 1994 fue puesto en operación el primer robot de transmisión directa en México con dos grados de libertad realizado en el *Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada* (CICESE por *Rafael Kelly, Fernando Reyes & Víctor Santibáñez*).
-  En 1998, fue puesto en operación el primer robot de transmisión directa de tres grados de libertad en México, (*Fernando Reyes*)

Escuela de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.



El 31 de octubre del año 2000 fue presentado el robot humanoide ASIMO, el cual puede caminar e interactuar con personas. Este robot fue fabricado por la compañía *Honda Motor Co. Ltd.*



En 2002 la compañía *General Motors Controls, Robotics and Welding* (CRW) donó al *Museo Nacional de Historia Americana* el prototipo original del robot PUMA.



En 2010 se desarrollaron los robots de cuarta generación. Robots inteligentes, con sensores sofisticados y control en tiempo real.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

1.7 Sociedades científicas de robótica



Esta sección está destinada a presentar un conjunto de foros científicos de alta calidad de diversas sociedades del área de robótica: revistas especializadas y conferencias nacionales e internacionales.

A continuación se enlistan las sociedades más importantes que desarrollan el área de la robótica y la automatización.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Sociedades internacionales:



IEEE *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*

www.ieee.org



IFAC *International Federation on Automatic Control*

www.ifac-control.org



IASTED *International Association of Science and Technology for Development* www.iasted.org



WSEAS *World Scientific and Engineering Academy and Society*

www.wseas.org




6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS

ALFAOMEGA




-  IFR *International Federation of Robotics* www.ifr.org
-  AER *Asociación Española de Robótica y ATP Automatización y Tecnologías de la Producción*
www.aeratp.com
-  BARA *British Association of Robotics and Automation*
www.bara.org.uk
-  DIRA *Dansk Robot Forening* www.dira.dk
-  TRS *Thai Robotics Society* www.trs.or.th
-  RT *Robotics Trends* www.roboticstrends.com
-  INTECH www.intechweb.org

Sociedades científicas nacionales:

-  AMCA *Asociación Mexicana de Control Automático, A. C.* pertenece a la Federación Internacional de Control Automático (IFAC)
www.amca.org.mx
-  AMM *Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C.* www.mecamex.net
-  AMROB *Asociación Mexicana de Robótica A. C.*
<http://ciep.ing.uaslp.mx/amrob>

Revistas científicas indexadas: Journals & Transactions

(ver <http://science.thomsonreuters.com>).

-  Advanced Robotics
-  IEEE Robotics and Automation Magazine
-  IEEE Control

-  IEEE Control Systems
-  IEEE Transactions on Robotics and Automation
-  International Journal of Robotics and Intelligent Systems
-  International Journal of Robotics Research
-  Journal of Robotic Systems
-  Robótica
-  Robotics and Autonomous Systems
-  Automática
-  International Journal of Robotics and Automation
-  International Journal of Modelling and Simulation

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Principales congresos internacionales de robótica:

-  IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
-  IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
-  IEEE Decision and Control.
-  IFAC Symposium on Robot Control.
-  IFAC World Congress.
-  International Conference on Advanced Robotics.
-  International Symposium on Experimental Robotics.
-  Congreso Latinoamericano de Control Automático (IFAC).
-  IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control.


6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS

ALFAOMEGA

 IASTED Robotica.


Principales congresos nacionales de robótica:

 Congreso de la Asociación Mexicana de Mecatrónica.


 Congreso de la Asociación Mexicana de Robótica (COMROB)


 Congreso de la Sociedad Mexicana de Física (SMF)


 Congreso de la Sociedad Mexicana de Instrumentación (SOMI)


 Congreso de la Asociación Mexicana de Control Automático (AM-CA)


Principales fabricantes de robots industriales:


 KUKA: www.kuka.com


 FANUC: www.fanucrobotics.com


 ABB: www.abb.com

 MOTOMAN: www.motoman.com

 YASKAWA: www.yaskawa.com

 EPSON: www.robots.epson.com

 UNIMATE www.prsrobots.com/unimate.html

 ROBAI www.robai.com

 YAMAHA ROBOTICS www.yamaharobotics.com

1.8 Resumen



La robótica es un área multidisciplinaria que aborda el análisis, desarrollo de robots y sus potenciales aplicaciones. Hoy en día, se ha convertido en una área estratégica y clave para todo país en desarrollo, es sinónimo de modernización. Dentro del sector industrial todos los procesos productivos se encuentran automatizados a través de robots. Industrias como armadoras automotrices, fundidoras, alimentos, maquiladoras, etc., emplean robots manipuladores como tecnología indispensable debido a que elevan la productividad y calidad del producto que va al consumidor. La rentabilidad y viabilidad de empresas está en manos de la robótica.

Dentro del sector de la salud, operaciones peligrosas que antaño eran sumamente complicadas, hoy en día resultan relativamente simples gracias al empleo de robots manipuladores que se han convertido en herramientas sofisticadas de alta precisión y desempeño, circunstancia que ha proporcionado una mejor esperanza de vida a los pacientes. El empleo de robots en aplicaciones de fisioterapia asistida por robótica es otro escenario donde los robots han ganado terreno y popularidad.

Como una referencia de importancia que ha tenido la robótica a nivel internacional se tiene que una gran cantidad de escuelas, universidades latinoamericanas, europeas, norteamericanas, asiáticas desde niveles medio superior hasta doctorado cultivan como carrera o especialidad el área de la robótica. México no es la excepción, ya que universidades y centros de investigación de al menos 29 entidades federativas incluyen en la currícula del plan de estudios o realizan investigación en robótica.

La robótica por su característica multidisciplinaria requiere desarrollar habilidades y conocimientos. Estudiar robótica implica ser una persona bilingüe. También se requiere trabajar en equipo, así como tener sólidos conocimientos de las ciencias exactas e ingeniería. La robótica no sólo es tecnología y conocimientos, también involucra arte y cultura.



1.9 Referencias Selectas

A continuación se presenta una relación de referencias recomendadas por secciones en donde el lector puede encontrar información complementaria, o profundizar en cada uno de los tópicos presentados en este capítulo.



1.1 Introducción

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



Tsuneo Yoshikawa. “*Foundations of robotics: analysis and control*”. The MIT Press. 1990.



IEEE Spectrum <http://spectrum.ieee.org>



Lorenzo Sciavicco and Bruno Siciliano. “*Modelling and control of robot manipulators*”. Second Edition. Springer. 2005.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



Fernando Reyes & Jaime Cid. “*La robótica y su impacto en la sociedad*”. CONCYTEP. Saberes Compartidos. Vol. 4, núm. 5, 2010. pp. 19-27. 2010.








1.2 Tipos de robots







J.C. Alexander and J.H. Maddocks. “*On the kinematics of wheeled mobile robots*”. The International Journal of Robotics Research, 8(5), 15-27 (1989).

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

-  Richard C. Dorf. “*Concise international encyclopedia of robotics: applications and automation*”. Editorial Board. John Wiley and Sons, Inc. 1990.
-  R. M. Murray, Z. Li and S.S. Sastry, “*A mathematical introduction to robotic manipulation*”, CRC Press, 1994.
-  Shimon Y. Nof. “*Handbook of industrial robotics*”. Second Edition. John Wiley and Sons Inc. 1999.
-  Clarence W. de Silva. “*Mechatronics*”. CRC Press, 2004.
-  Harry Colestock “*Industrial robotics: selection, design and maintenance*”, McGraw-Hill, 2004.



1.3 Control de robots manipuladores

-  Richard P. Paul. “*Robot manipulators: mathematics, programming, and control*”. The MIT Press. 1981.
-  H. Nijmeijer and A.c.J. van der Schaft. “*Nonlinear dynamical control Systems*”, Springer-Verlag, New York (1990).
-  M. Vidyasagar. “*Nonlinear systems analysis*”. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1993).
-  R.M. Murray, Z. Li and S.S. Sastry. “*A mathematical introduction to robotic manipulation*”. CRC Press (1994).

-  A. Isidori. “*Nonlinear control systems*”. Springer-Verlag, London, UK (1995).
-  Karl J. Åström and Björn Wittenmark. “*Computer controlled systems: theory and design*”. Third Edition. Prentice Hall Inc. 1997.
-  Shankar Sastry. “*Nonlinear systems: analysis stability and control*”. Springer 1999. 6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary
-  Hassan K. Khalil. “*Nonlinear systems*”. Third Edition. Prentice Hall Inc. 2002.
-  R. Kelly y V. Santibáñez. “*Control de movimiento de robots manipuladores*”. Printice-Hall, Pearson. 2003.
-  R. Kelly, V. Santibáñez and A. Loria. “*Control of robot manipulators in joint space*”. Springer-Verlag London 2005.
-  Mark W. Spong and Seth Hutchinson, M. Vidyasagar. “*Robot modeling and control*”. John Wiley and Sons, Inc. 2006. 6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary
-  Wassim M. Haddad and VijaySekhar Chellaboina. “*Nonlinear dynamical systems and control: a Lyapunov-based approach*”. Princeton University Press. 2008.
-  Katsuhiko Ogata. “*Modern control engineering*”. Prentice-Hall, Pearson. 5th Edition, August 2009.
-  Agustín Jiménez and Basil M. Al Hadithi. “*Robot manipulators, trends and development*”. INTECH, 2010. 653e439edb57461d757
ebrary

1.9 Referencias Selectas



1.4 Tecnología de robots



Haruhiko Asada & Kamal Youcef Toumi. "*Direct-drive robots: theory and practice*". MIT Press Classics, 1987.



www.parkercompumotor.com



www.nsk.com.com

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



1.5 Estadísticas de robótica



www.ifr.org



www.worldrobotics.org



"*World robotics: industrial robots*". IFR. Statistical Department. 2010.



www.automatica-munich.com

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



1.6 Historia de la robótica





Brian Armstrong-Hélouvy, Pierre Dupont and Carlos Canudas de Wit. "*A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction*". Automatica, Vol. 30. No. 7, pp. 1083-1138. 1994.



Nof, Shimon Y. "*Handbook of industrial robotics*". Jhon Wiley and Sons, Segunda edición, 1999. pag. 3-5.


6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary
ALFAOMEGA


 Paolo Galluzzi. “*Renaissance engineers from Brunelleschi to Leonardo da Vinci*”. Giunti, Istituto e Museo di Storia della Scienza, Florence. 2001.


 Frank Zöllner y Johannes Nathan. “*Leonardo da Vinci*”. Editorial Taschen, 2003.

 Julio Arrechea. “*Leonardo artista, físico, inventor*”. Editorial Libsa, 2005.

 Domenico Laurenza, Mario Taddei y Edoardo Zanon. “*Atlas ilustrado de las máquinas de Leonardo*”. Editorial Susaeta. 2007.

 Mario Taddei. “*I robot di Leonardo*”. Editado por Leonardo3. 2007.

 www.mostredileonardo.com

 www.leonardo3.net

1.10 Problemas propuestos

Esta sección contiene una serie de problemas de reflexión y razonamiento cuya finalidad está enfocada a mejorar la habilidad del lector para comprender la importancia, relevancia e impacto que tiene la robótica en la sociedad.



1.1 Introducción

1.1.1 ¿Qué es la robótica?

1.1.2 ¿Cómo se define un robot manipulador?

1.10 Problemas propuestos

- 1.1.3 ¿Cómo se define un robot industrial?
- 1.1.4 ¿Porqué la robótica es de naturaleza multidisciplinaria?
- 1.1.5 Mencione al menos 3 características de la robótica que impacten en la sociedad.
- 1.1.6 ¿Porqué un robot manipulador puede ser empleado en cirugías de alto riesgo?
- 1.1.7 ¿Porqué un robot manipulador puede asistir a personas con capacidades diferenciadas y en fisioterapia?

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

1.2 Tipos de robots

- 1.2.1 ¿Cuál es la clasificación de robots?
- 1.2.2 Describa las características de los robots móviles.
- 1.2.3 Describa las características de los robots humanoides.
- 1.2.4 Describa las características de un robot industrial y cómo está estructurado.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757

ebrary



1.3 Control de robots manipuladores

- 1.3 .1 ¿Porqué es importante el control automático en robótica?
- 1.3 .2 Describa a grandes rasgos qué es un algoritmos de control.
- 1.3 .3 ¿Porqué el control clásico no se aplica en robótica?
- 1.3 .4 ¿Qué tipo de técnicas de control puede citar para diseñar esquemas para robots manipuladores?
- 1.3 .5 Describa al menos 5 aplicaciones que tiene el control de robots manipuladores.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



1.4 Tecnología de robots

- 1.4 .1 ¿Porqué se emplean engranes en robots industriales?
- 1.4 .2 ¿Qué desventajas y ventajas presentan los engranes?
- 1.4 .3 ¿Qué significa tecnología de transmisión directa?
- 1.4 .4 ¿Qué ventajas representa la tecnología de transmisión directa con respecto a los engranes?
- 1.4 .5 ¿Cómo se define un robot de transmisión directa?



1.5 Estadísticas de robótica

- 1.5 .1 ¿Porqué se considera a la robótica un área clave y estratégica de todo país en desarrollo?
- 1.5 .2 ¿Describa la estadística de robots empleados en el mundo y cuáles son sus principales funciones?
- 1.5 .3 ¿Porqué en la gran mayoría de las universidades han incorporado el área de robótica?

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



1.6 Historia de la robótica

- 1.6 .1 ¿Porqué se considera a Leonardo da Vinci como científico e ingeniero?
- 1.6 .2 ¿Describa algunos hechos históricos de la robótica en la era contemporánea?
- 1.6 .3 ¿Qué acontecimientos históricos puede citar que han sido claves para el desarrollo actual de la robótica?
- 1.6 .4 ¿Cuál es la tendencia actual de la robótica en el mundo?

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

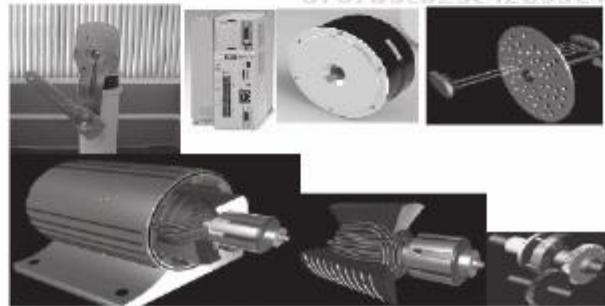
2

CAPÍTULO

Servomotores y sensores

Las ecuaciones de Maxwell resumen la teoría electromagnética y resultan invariantes ante otro tipo de transformaciones.

Hendrik Antoon Lorentz







- 2.1 Introducción
- 2.2 Servomotores
- 2.3 Sensores
- 2.4 Encoders
- 2.5 Resumen
- 2.6 Referencias selectas
- 2.7 Problemas propuestos

Objetivos




Presentar los principales servomotores y sensores que se emplean en el diseño y construcción de robots, haciendo hincapié en:

Objetivos particulares:

-  Funcionamiento básico de servomotores.
-  Tecnología de transmisión directa y sus ventajas en robótica.
-  Clasificación de sensores analógicos de robots manipuladores.
-  Funcionamiento básico de encoders ópticos (incrementales y absolutos) y magnéticos.

Competencias

Adquirir las habilidades necesarias para:

-  Seleccionar tecnología de servomotores para diseñar y construir robots.
-  Entender los fenómenos importantes del sistema de engranaje.
-  Identificar los sensores de posición de robots.

2.1 Introducción

Los servomotores y sensores son dispositivos fundamentales para el diseño y construcción de cualquier tipo de robot. Los servomotores son sistemas electromecánicos que pertenecen a una clase particular de *actuadores eléctricos* encargados de transmitir energía para producir el movimiento del robot, y son los que forman las uniones o articulaciones del robot mediante las cuales éste se mueve, motivo por el cual al movimiento del robot se le denomina **desplazamiento articular**. La tecnología asociada a los servomotores es complicada, ya que su electrónica está basada en microprocesadores avanzados de procesamiento como los DSP's (*digital signal processors*) para llevar a cabo el análisis y control de las diversas variables que determinan su modo de operación.

El empleo de sensores en robótica es necesario para realizar control automático, y por lo tanto la automatización de procesos. Los robots pueden incluir sensores internos y externos. Los sensores internos (encoders) proporcionan información sobre la posición, velocidad y aceleración de movimiento, con estas variables y el uso del modelo dinámico es posible analizar y entender todos los fenómenos físicos del robot. Por lo tanto, se pueden evaluar experimentalmente algoritmos de control y determinar su robustez y desempeño en diversas aplicaciones. Los sensores externos como fuerza, presión y visión, dotan al robot de un sistema de percepción que no sólo mejora su eficiencia, también lo hace responder de manera versátil y autónoma al interactuar con su ambiente o espacio de trabajo.

En robótica los sensores más ampliamente usados son los sensores de posición. Dependiendo del tipo de tecnología empleada en la fabricación de los sensores de posición, éstos pueden ser analógicos o digitales. Los sensores analógicos tienen una respuesta eléctrica (señal continua de voltaje) con información de movimiento del robot. Sin embargo, se requiere convertir esta señal a formato digital para que pueda ser procesada por algún sistema mínimo para propósitos de instrumentación y control.

La clasificación de un sensor como analógico, no obedece únicamente a que los materiales y componentes empleados sean analógicos en el proceso de fabricación. Lo que hay que tomar en cuenta es que diversos sensores analógicos ya tienen integrado el sistema electrónico para convertir la respuesta analógica en formato digital, y debido a que su señal de salida está digitalizada, entonces se denomina sensor digital. Un ejemplo clásico de sensor digital es el caso de un termómetro digital de temperatura: sus componentes son analógicos, debido a que emplean como elemento sensor un transistor o termopar y la medición de la temperatura está digitalizada en una pantalla de cristal líquido (*led, liquid crystal display*), lo cual lo hace un sensor digital.

Ejemplos de sensores analógicos de posición de robots son los resolvers, los potenciómetros y los tacómetros. Por otro lado, los sensores digitales de posición más comunes son los encoders.

La mayoría de los sensores se construyen en base a propiedades físicas de materiales semiconductores. Generalmente, las señales de salida tienen que ser acondicionadas a través de instrumentación electrónica. La función de los sensores es medir una variable asociada al fenómeno físico, tal como posición, temperatura o presión, y producir una señal medible como voltaje o corriente. Un *transductor* es un sensor que incluye el sistema electrónico para convertir un tipo de energía (asociada al fenómeno físico), a otro tipo de energía medible (energía de salida).

Un transductor es un dispositivo que convierte un tipo de energía (es decir, energía de entrada o variable de medición) a otro tipo de energía medible (energía de salida, por lo común energía eléctrica en milivolts). Un ejemplo de transductor es la resistencia magnética que convierte el campo magnético en corriente eléctrica.

Generalmente, por la tecnología que incluyen los sensores, actualmente se les considera transductores.

2.2 Servomotores

En este capítulo se presentan servomotores empleados en la construcción de robots manipuladores y los sensores internos que incluyen para medir la posición.

2.2 Servomotores

Un servomotor está compuesto principalmente por tres elementos: motor eléctrico, sensor de posición para medir el desplazamiento articular (rotacional o lineal) y el amplificador electrónico (*electronic driver*), o servo amplificador constituido por un conjunto de microprocesadores y electrónica de potencia que se encarga de acoplar y acondicionar al motor la impedancia y señal de voltaje de baja potencia que proviene de la computadora o de un sistema mínimo digital. Evidentemente, el motor requiere mucha mayor potencia para su correcto funcionamiento.

$$\text{Servomotor} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Amplificador electrónico} \\ \text{Motor} \\ \text{Sensor de posición} \end{array} \right.$$

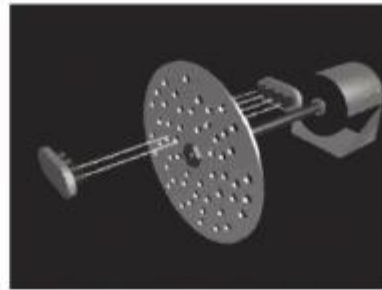
En la figura 2.1 se muestran los componentes básicos de un servomotor: motor eléctrico, sensor de posición que proporciona información del desplazamiento articular, el cual está fabricado por un disco codificado y un ensamble de dispositivos emisores de luz y fotodetectores para generar una señal de salida proporcional al movimiento (rotacional o lineal) del motor, y el amplificador electrónico encargado de realizar el funcionamiento correcto del servomotor.

Los servomotores tienen tres modos de operación: posición, velocidad y par. El **modo posición** permite mover al motor a una posición preestable-

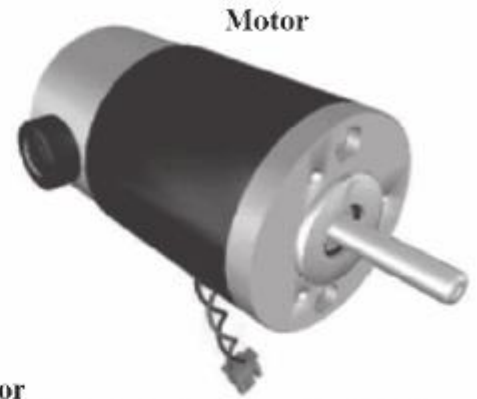
James Clerk Maxwell (1831-1879)



En la ciudad de Edimburgo, Escocia, nació James Clerk Maxwell el 13 de junio de 1831. La principal aportación que brindó a la humanidad es su trabajo en la teoría electromagnética clásica. Las 4 ecuaciones de Maxwell resumen las leyes de la electricidad, el magnetismo y la óptica. Maxwell es considerado el científico del siglo XIX por sus múltiples aportaciones a la ciencia. A la edad de 13 años inició sus estudios universitarios, escribió su primer trabajo de mecánica a los 15, a los 25 años fue nombrado catedrático en Aberdeen y a los 40 años ocupó un puesto importante en Cambridge. Maxwell murió a la edad de 48 años el 5 de noviembre de 1879.



Encoder



Motor



Amplificador



Señal de salida

Figura 2.1 Partes básicas de un servomotor: motor eléctrico, sensor de posición y amplificador electrónico.

cida, también conocida como *set point*. Sin embargo, no puede desplazar cargas o aplicar una fuerza determinada. En este modo se emplean reguladores simples como el proporcional derivativo (PD) y proporcional integral derivativo (PID). El *modo velocidad* controla el movimiento del motor sobre una velocidad deseada. Tampoco puede ejercer fuerza como en el caso del modo de posición. Estos modos tienen la característica de ser arquitectura cerrada, es decir, no permiten programar otro tipo de controladores, por lo que sus aplicaciones en robótica se encuentran limitadas.

El *modo par* es el que se emplea en robótica y su principal característica es la arquitectura abierta, lo que hace posible evaluar experimentalmente el desempeño y robustez de cualquier estrategia de control. De esta forma, las aplicaciones en robótica se incrementan. Asimismo, permite la interacción dinámica con el sistema mecánico del robot, por lo que es posible

compensar los efectos dinámicos del robot y en consecuencia controlar la posición o desplazamiento articular. El modo par también permite el control de la trayectoria y aplicaciones más complicadas como el control de impedancia, visual-servoing, teleoperación y control de fuerza.

Las ecuaciones de Maxwell permiten deducir una ley fundamental para servomotores que determina la relación entre el campo electromagnético y el par (**torque**) aplicado. En general la generación de movimiento rotacional con respecto a su eje de giro es producido por el par aplicado, esta simple ley es la base del desarrollo de la robótica y está planteada en la siguiente ecuación:

$$\tau = kv \quad (2.1)$$

en donde τ representa el par aplicado al servomotor y sus unidades de medición son Nm (*Newton-metro*), k es una constante que representa la ganancia del amplificador electrónico y tiene unidades de $\frac{Nm}{V}$ (*Newton-metro/Volt*) y la variable v es el voltaje que proviene de la computadora representa el comando o ley de control que programa el usuario para que el robot lleve a cabo una aplicación específica. No todos los motores eléctricos cumplen con la ecuación (2.1), como son los casos de algunos motores de corriente alterna y motores de pasos, y por esta razón no forman parte de la estructura del sistema mecánico del robot, pueden ser empleados en la construcción de garras mecánicas o de herramientas específicas que se colocan en el robot para diversas aplicaciones.

El amplificador del servomotor (servo amplificador) es un sofisticado sistema electrónico cuyo objetivo principal es llevar a cabo la función de la ecuación (2.1). Posee un complejo sistema electrónico para controlar los campos electromagnéticos y procesar comandos secuenciales para la etapa de potencia que se encarga de proporcionar la señal trifásica de ali-

Ecuaciones de Maxwell

La relación entre los campos eléctricos y magnéticos, así como la propagación de ondas electromagnéticas se encuentran descritas por las ecuaciones de Maxwell. Originalmente Maxwell planteó 20 ecuaciones escritas en cuaterniones y no en formato diferencial. Actualmente las 4 ecuaciones de Maxwell incluyen las leyes de Gauss, Faraday y Ampere. Las expresiones reducidas para el caso del vacío son las siguientes:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= \mathbf{0} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

donde \vec{E} es el campo eléctrico, ρ es la densidad de carga, ϵ_0 es la permitividad eléctrica en vacío, \vec{B} es el flujo magnético, μ_0 es la permeabilidad magnética y \vec{j} significa la densidad de corriente. Por otro lado, las ecuaciones de Maxwell son fundamentales para desarrollar la ley fundamental de los servomotores:

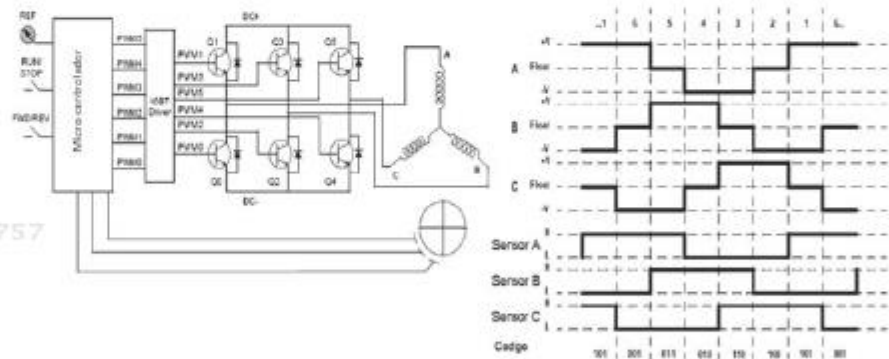
$$\tau = kv$$

Esta ecuación es la función principal que realiza un servo amplificador.

mentación directamente de la fuente de alimentación de corriente directa, con el suministro correspondiente requerido por el motor. En este punto es importante aclarar que los motores son especiales, emplean voltaje trifásico pero esto no significa que se alimentan de la línea trifásica de 220 VAC o 440 VAC. Más bien, en este caso la señal senoidal trifásica es generada en forma discreta (emulando a la señal trifásica continua) por el amplificador electrónico y en cada periodo de muestreo alimenta al motor con voltaje directo; el valor pico a pico de la señal trifásica está en función de las características del motor, por ejemplo pueden ser de 24, 40, 70 Volts, etc.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

De esta forma se envían las correspondientes fases a las bobinas (sensores magnéticos) del motor produciendo un par aplicado que permita movimiento rotacional. En la figura 2.2 se muestran el sistema mínimo, la etapa de potencia y la generación de las señales trifásicas de voltaje directo.



Fase	Sensor C	Sensor B	Sensor A	Nivel alto C	Nivel Bajo C	Nivel alto B	Nivel Bajo B	Nivel alto A	Nivel Bajo A
1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
2	1	0	0	1	0	0	0	0	1
3	1	1	0	1	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	0	0	1
5	0	1	1	0	1	1	0	0	0
6	0	0	1	0	1	0	0	1	0

Figura 2.2 Amplificador electrónico del servomotor.

Cuando a un servomotor se le acondiciona mecánicamente una barra de

metal para formar un péndulo o eslabón, al sistema resultante se le denomina *servo mecanismo* e incluye el servomotor con el sistema mecánico acoplado.



2.2.1 Principios básicos de motores eléctricos

Los motores representan una tecnología bien establecida que combina eficiencia y alto desempeño para facilitar los procesos de automatización. El primer motor fue construido en 1821 por el científico e inventor británico Michael Faraday, quien colocó un magneto sobre un plato cóncavo con mercurio y conectó un polo del magneto y del plato con una batería, resultando un campo magnético que produjo movimiento circular en este sencillo motor de un polo. Posteriormente, Faraday perfeccionó este experimento. En 1832 William Sturgeon, científico británico e inventor del electromagneto, construyó un motor de cuatro polos para un asador, con lo que creó la primera cocina moderna.

Los detalles de los motores eléctricos han cambiado desde Faraday y Sturgeon. Sin embargo, los elementos fundamentales han permanecido hasta nuestros días. El movimiento creado por un motor eléctrico obedece a la fuerza de Lorentz la cual establece que cuando se coloca un conductor que transporta corriente en un campo magnético, se genera una fuerza ortogonal (perpendicular) al flujo de corriente, como se muestra en la figura 2.3. La fuerza de Lorentz es también referida como la regla de la mano derecha.

Si se coloca una simple bobina en el campo magnético como se muestra en la figura 2.3 la fuerza empuja al segmento B. Por otro lado, en el segmento A la corriente está fluyendo en dirección opuesta respecto de cómo fluye en el segmento B, lo cual da un movimiento de rotación en sentido positivo o contrario al sentido de rotación de las manecillas del reloj. Si se cambia la polaridad, entonces cambiará el sentido de la corriente por lo que la fuerza de Lorentz producirá una rotación en sentido negativo.

Michael Faraday (1791-1867)



Físico y químico británico, Michael Faraday nació el 22 de septiembre de 1791 en la ciudad de Newington, Londres. Realizó importantes aportaciones al electromagnetismo, en particular descubrió la inducción electromagnética y construyó una máquina que llamó rotación electromagnética (motor eléctrico). Asimismo, introdujo el concepto de líneas de fuerzas para representar campos magnéticos. Con sus aportaciones ayudó a desarrollar la tecnología moderna de motores eléctricos. En 1831 demostró la existencia del campo magnético alrededor de un conductor cuando circula una corriente. En su honor el *faradio* (F) es la unidad de capacidad eléctrica de un conductor. Faraday falleció a la edad de 75 años el 25 de agosto de 1867 en Londres, Inglaterra.

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)



El 18 de julio de 1853 nació Hendrik Antoon Lorentz en Arnhem, Holanda. Este físicomatemático recibió el Premio Nobel de Física en 1902, las Medallas Rumford en 1908, Franklin en 1917 y Copley en 1918. Realizó sus estudios universitarios en la Universidad de Leiden, donde trabajó como profesor investigador. Realizó aportaciones en mecánica, termodinámica, hidrodinámica, teoría cinética y teoría del estado sólido. Sin embargo, sus trabajos más importantes se encuentran en el electromagnetismo, la teoría del electrón y la teoría de la relatividad. Lorentz demostró que las ecuaciones de Maxwell resultan invariantes ante las denominadas transformaciones de Lorentz. Falleció el 4 de febrero de 1928 en Haarlem.

Al proceso de alternar o conmutar el sentido de la polaridad en la bobina se le denomina proceso de conmutación, y éste es el fundamento básico de los motores eléctricos.

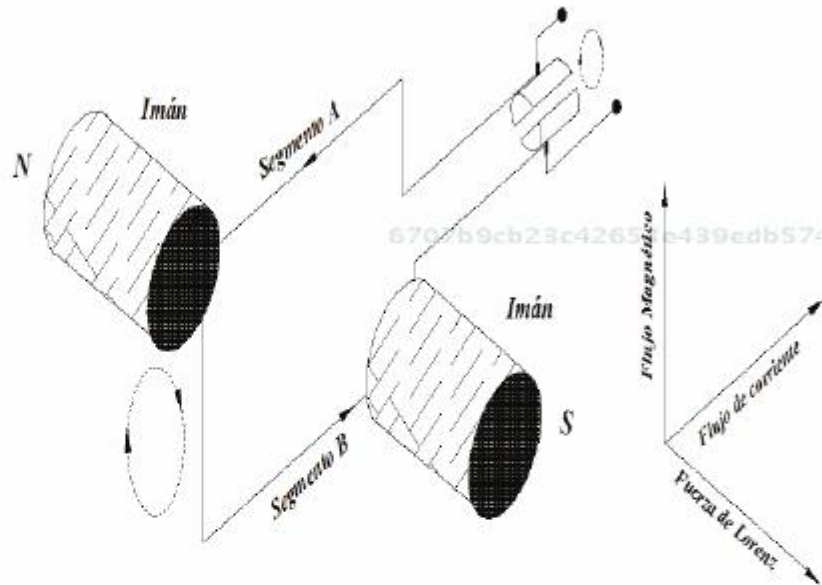


Figura 2.3 Funcionamiento básico de los motores eléctricos.

Los componentes principales de los motores eléctricos son: armadura, conmutador, rotor (embobinado) y estator.

En la figura 2.4 se muestran los elementos básicos del motor eléctrico.

A continuación se presenta una breve descripción de estos componentes:



Estator: es el casco del motor o carcasa; el estator es un magneto permanente que rodea a la flecha y la armadura. El estator se encuentra fabricado con componentes ferromagnéticos que proveen el flujo del campo magnético. Este componente no se mueve, es decir permanece estático.

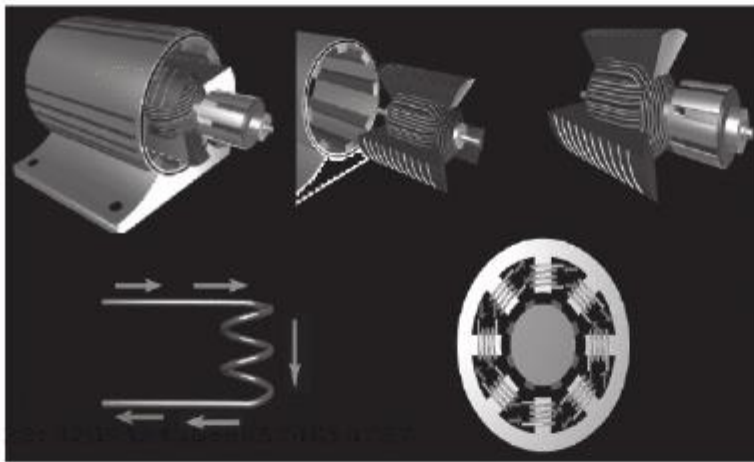


Armadura: consta de una o más bobinas montadas sobre una flecha central (rotor); la corriente es conmutada a través de esas bobinas por medio de un conmutador. Como la fuerza de Lorentz impulsa a las bobinas, la fuerza de rotación (par o torque) es transmitida a la flecha para que gire (fuerza contra-electromotriz).



Conmutador: consta de dos platos divididos en la flecha o rotor, lo que proporciona potencia a la armadura de las bobinas, además de que están conectados a la fuente de alimentación por medio de escobillas.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



6707b9cb
ebrary

Figura 2.4 Componentes básicos de los motores eléctricos.

Los motores eléctricos pertenecen a una clase especial de transductores, debido a que convierten un tipo de energía (eléctrica) a otro tipo de energía (mecánica). Este concepto está relacionado con la forma de medir el rendimiento y eficiencia del motor \mathcal{E}_{sm} , la cual se define como la relación entre la energía mecánica \mathcal{E}_m y la energía eléctrica \mathcal{E}_e , es decir, $\mathcal{E}_{sm} = \frac{\mathcal{E}_m}{\mathcal{E}_e}$. Idealmente esta relación debería ser del 100 %. Sin embargo, en la práctica la eficiencia de un motor está muy lejos de lo ideal y su valor depende del tipo y calidad de las componentes del motor.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



Sistemas de engranaje

El diseño de robots está estrechamente relacionado con un adecuado conocimiento de engranes. En la página web del libro se presenta teoría y ejemplos sobre sistemas de engranaje, fichas técnicas, acoplamiento y tipos de engranes, sistemas satelitales, configuraciones, materiales de construcción, relación de reducción de vueltas y amplificación de fuerza, criterios de selección, forma específica de los dientes del engrane, cálculos de ingeniería y fórmulas de diseño.

También se muestran videos que ejemplifican diversas aplicaciones tanto de la robótica como en general de servomecanismos que involucran el uso de engranes.

Por lo general, los motores eléctricos producen velocidades rotacionales elevadas, por ejemplo más de 1000 revoluciones por minuto. Supóngase que se desea acoplar mecánicamente una barra de aluminio a la flecha del rotor, operar esto a esa velocidad puede ser muy peligroso e inclusive mortal. Para los propósitos de la robótica estos actuadores deben proporcionar una velocidad máxima del orden de la del brazo humano que puede girar sin fatiga un promedio de 120 revoluciones por minuto o 2 revoluciones por segundo, lo cual representa el ancho de banda de un robot.

Otra desventaja de los motores eléctricos es que no proporcionan alto par o torque necesario para desplazar cargas. Existe un dispositivo mecánico que soluciona ambos problemas, esto es, que reduce la velocidad de giro y amplifica el par; dicho dispositivo se conoce como sistema de engranaje. La gran mayoría de los robots industriales (robots convencionales) están contruidos con servomotores acoplados a sistemas de engranaje.

En la figura 2.5 se muestra un sistema de engranes que está acoplado a un servomotor como reductor de velocidad. Hay que tomar en cuenta que

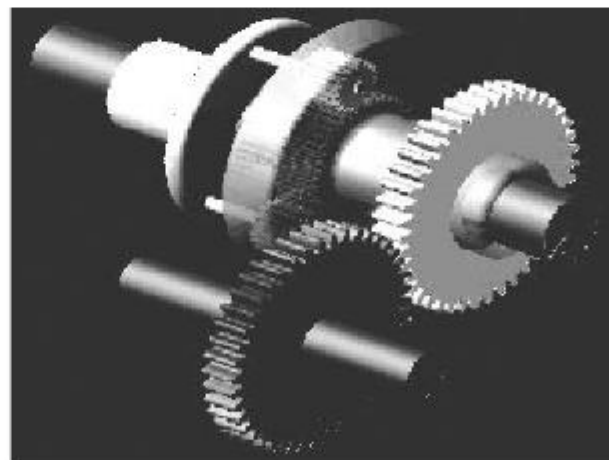


Figura 2.5 Sistema de engranes.

el sistema de engranaje complica el diseño mecánico del robot, puesto que se requiere precisión en el maquinado de los dientes del engrane para

evitar juego mecánico o *cascabeleo*. Además, el sistema de engranes incrementa la fricción (la cual es un fenómeno disipativo) y como consecuencia del roce mecánico entre los dientes de los engranes la energía mecánica se convierte en energía térmica, calentándose así las piezas metálicas y deteriorando y acortando el tiempo de vida del sistema de engranes, todo lo cual disminuye el desempeño del servomotor.

Hoy en día, los motores eléctricos son sistemas electromecánicos modernos y muy complejos. En la figura 2.6 se muestra la imagen de un servomotor equipado con sistema de engranaje insertado en la parte frontal del motor para disminuir la velocidad rotacional del rotor y al mismo tiempo amplificar el par o torque. Un sensor de posición (encoder) se encuentra localizado en la parte posterior de la flecha del motor para medir el desplazamiento articular.

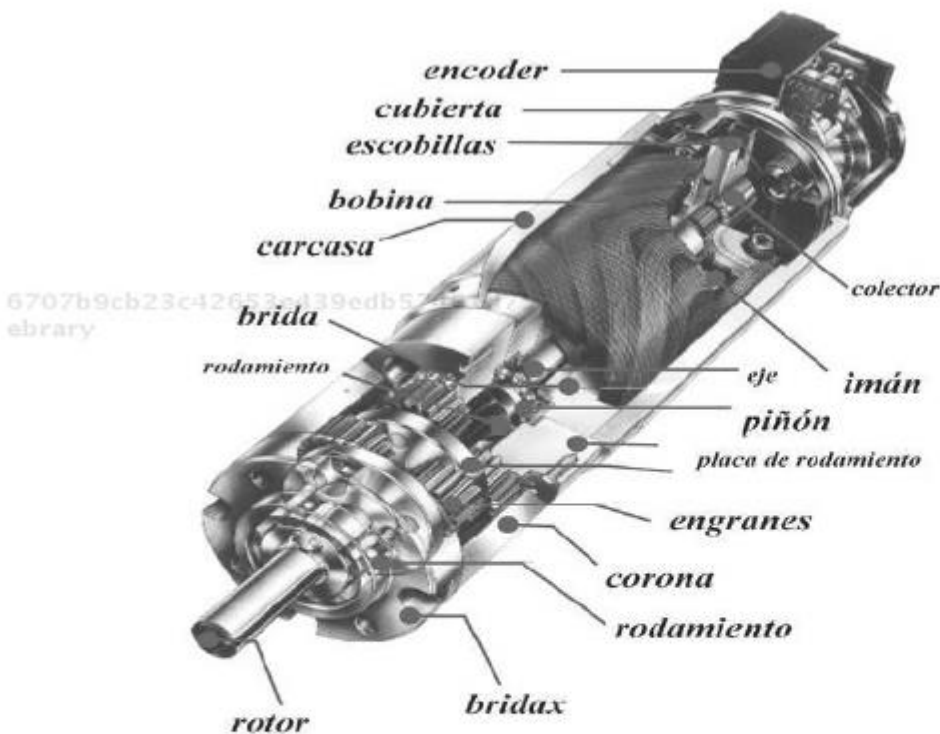


Figura 2.6 Componentes de un motor eléctrico moderno.



Tecnología de transmisión directa

Por las prestaciones y cualidades que presentan los servomotores de transmisión directa representan una atractiva opción para el diseño de robots manipuladores. Funcionan como fuente de par aplicado, lo que los hace atractivos para diseñar plataformas experimentales para realizar investigación científica en robótica y experimentación de calidad. El modo par del servo amplificador le permite funcionar en arquitectura abierta, es decir, puede ser evaluada experimentalmente cualquier estrategia de control. El encoder incremental que incluye el servomotor puede llegar a tener una resolución de 4,096,000 pulsos por revolución. En la página web del libro se presentan cálculos y detalles de ingeniería para construir robots manipuladores empleando tecnología de transmisión directa.



2.2.2 Servomotores de transmisión directa

La transmisión directa (*direct drive*) representa la nueva tecnología de la robótica, debido a las ventajas que tiene sobre los robots convencionales con sistema de engranaje. El concepto de transmisión directa fue establecido por Haruhiko Asada en 1980, y consiste en que el rotor del motor funciona como una fuente de par; aquí el sistema de engranes tradicional está completamente eliminado, por lo que desaparece el *cascabeleo* o falta de movimiento y reduce significativamente el fenómeno de fricción, comparado con los robots convencionales; la construcción mecánica es más simple y la exactitud en el posicionamiento de robots manipuladores es mejorada.

En el motor de transmisión directa, la flecha ha desaparecido y no se requiere el sistema de engranes para disminuir la velocidad de giro y amplificar el par. En la figura 2.7 se muestra la configuración del motor de transmisión directa.



Figura 2.7 Rotor y estator del motor de transmisión directa.

El diseño de robots a través de servomotores de transmisión directa representa enormes ventajas, no sólo en sus prestaciones sino también en el sentido de que resulta clave para propósitos de realizar investigación científica de la robótica.

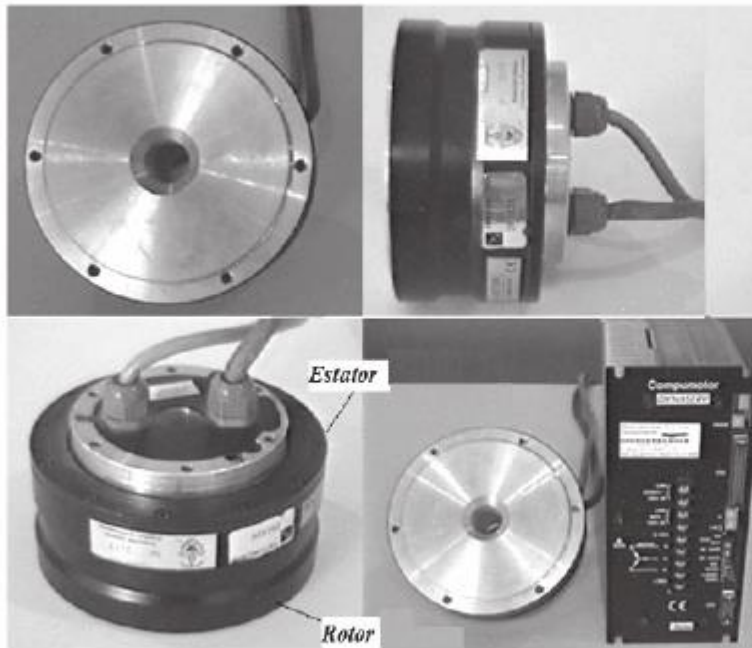
6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Figura 2.8 Motor y amplificador electrónico.

Las principales características de los servomotores de transmisión directa son las siguientes:



Arquitectura abierta para la evaluación experimental de cualquier algoritmo de control.



Funcionan como fuente de par.



No hay pérdidas en la transmisión de energía.



Reducción del fenómeno de fricción y juego mecánico.



No es necesario acoplamiento de engranes.



Proporciona alto par, sin sistema de engranaje.






No requieren calibración.



Modelado y programación sencilla.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary
ALFAOMEGA

-  Maquinado y construcción simple.
-  Transmisión directa de energía, sin pérdidas.
-  Alta resolución del sensor de posición (encoder 4,096,000 pulsos por revolución).

El principal inconveniente de los robots convencionales es el uso de engranes, necesarios para amplificar la capacidad limitada de par de motores como el que se muestra en la figura 2.9, lo cual hace que el diseño y construcción mecánica sean mucho más complejos. Los engranes amplifican el par del motor por un factor α ; esta proporción multiplica la inercia de los rotores por un factor de α^2 , causando que la inercia del rotor domine sobre la inercia de los eslabones y trayendo como consecuencia que la dinámica no lineal del robot pueda ser ignorada. Por ejemplo, una proporción típica de engranes de 100:1 reduce el efecto inercial de los eslabones por 10^{-4} . Además de esto, la identificación paramétrica de los momentos de inercia, centros de masa y coeficientes de fricción resulta una actividad complicada, en contraste la tecnología de transmisión directa facilita este proceso.

Por otro lado, el sistema de engranes produce fenómenos de elasticidad en las uniones e introduce fenómenos de fricción, en particular los pares debidos a la fricción pueden ser de considerable magnitud como para predominar sobre la dinámica del manipulador. Por ejemplo, la cantidad de fricción presente en el robot PUMA 600 puede llegar a ser hasta del orden del 40% del par máximo del motor.

Actualmente, los robots de transmisión directa constituyen la nueva generación de manipuladores cuya tecnología irá desplazando paulatinamente a los robots convencionales destinados a ensamble de alta velocidad que incluyen sistemas de engranes. En este contexto y para los propósitos de este libro, el término robot de transmisión directa se definirá de la siguiente manera:

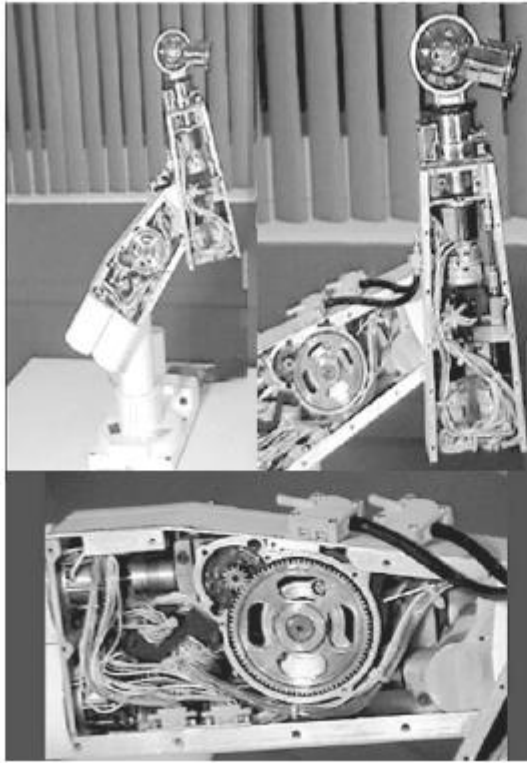


Figura 2.9 Sistema de engranaje del robot PUMA-200.

Un robot de transmisión directa es un manipulador multifuncional re-programable de uso general para realizar una amplia variedad de tareas, formado por eslabones rígidos conectados en serie a través de articulaciones fabricadas con servomotores de transmisión directa.

La figura 2.10 muestra un robot de transmisión directa de tres grados de libertad con movimiento tridimensional desarrollado en la *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla* (BUAP). Esta tecnología facilita el diseño, construcción y maquinado de los eslabones, así como la caracterización de los parámetros del modelo dinámico del robot tales como centros de masa, momentos de inercia, coeficientes de fricción, etc.

En la figura 2.11 se muestra el diagrama esquemático de un servomotor de transmisión directa en aplicaciones de control. El usuario puede



Programación de robots manipuladores

En la página web del libro se presenta el código fuente para programar robots manipuladores de transmisión directa como los diseñados y construidos en la *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*. La programación se realiza en lenguaje C, en tiempo real. El periodo de muestreo para los robots fue determinado en 2.5 mseg. Además se especifica la configuración del servo amplificador para que pueda operar en modo par, las características de la tarjeta de instrumentación electrónica y las rutinas que llevan a cabo la adquisición de la posición y el envío de la señal de control o par aplicado $v = \frac{\tau}{k}$. Adicionalmente se cuenta con una serie de videos experimentales en aplicaciones de control de posición, control de trayectoria, visual servoing, teleoperación, control de impedancia, etc.

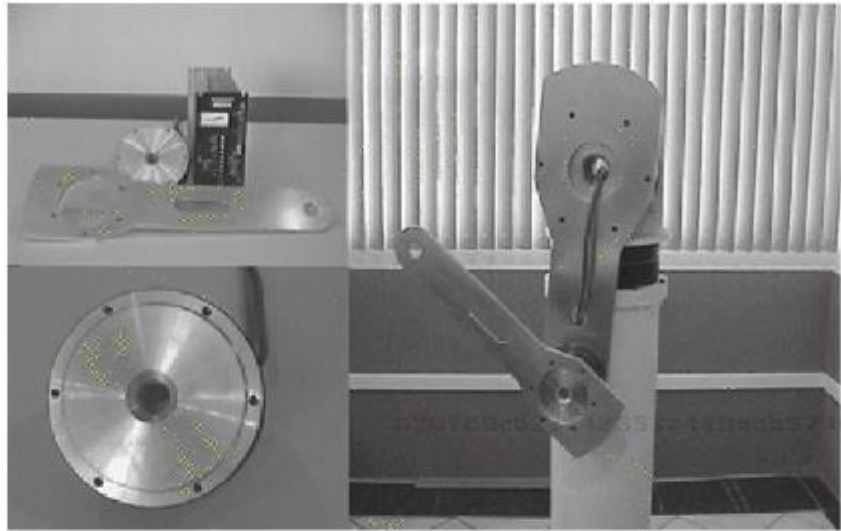


Figura 2.10 Robot de transmisión directa desarrollado en la BUAP.

implementar su estructura de control τ con el auxilio de algún lenguaje de programación, por ejemplo C, C++, C#, MatLab, etc. Por otro lado, las tarjetas de instrumentación electrónica contienen convertidores digital/analógico (DAC's) que envían al amplificador electrónico voltaje analógico v como señal de referencia del par τ , es decir, $v = \frac{\tau}{k}$, siendo k la ganancia del amplificador electrónico. De esta forma el servomotor actúa como una fuente ideal de par. El amplificador electrónico transforma la energía eléctrica (voltaje) en energía mecánica o par aplicado τ al servomotor para que produzca el movimiento de rotación o desplazamiento articular q y se mueva con velocidad de rotación o velocidad articular \dot{q} . Estas variables son adquiridas electrónicamente por FPGA (*field programmable gate array*) o contadores digitales incluidos en la tarjeta de instrumentación y enviadas a la computadora. Este ciclo se repite cada periodo de muestreo.

Debe tomarse en cuenta que la principal característica de los servomotores de transmisión directa es que funcionan como fuente de par, lo que se interpreta como *arquitectura abierta*, para que esto ocurra el servomotor debe ser configurado en modo par y operado dentro de su ancho de

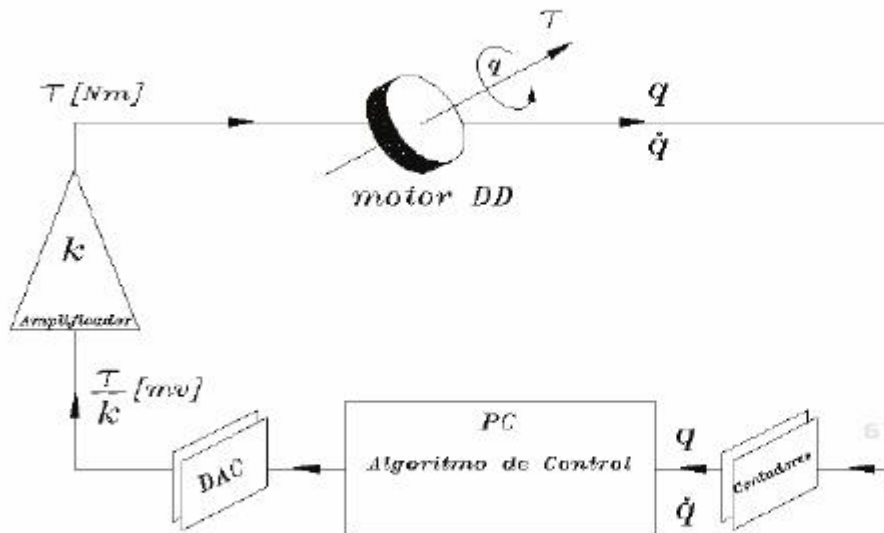


Figura 2.11 Diagrama esquemático de un servomotor de transmisión directa en aplicaciones de control.

banda, es decir, que la velocidad de rotación no exceda su límite máximo (dependiendo de las características del servomotor, la velocidad de corte puede tener un rango de 360 a 720 grados).

El principal beneficio que otorga la tecnología de transmisión directa se encuentra en su utilidad en la investigación y diseño de algoritmos de control para robots manipuladores. La *arquitectura abierta* es una característica intrínseca de los servomotores (*direct drive*), permite la evaluación de cualquier esquema de control y garantiza que el par calculado por la ecuación de la estrategia de control sea transferido sin pérdidas de energía al motor, es decir, que ese par aparezca físicamente con respecto al eje de giro del motor. De esta forma es posible evaluar experimentalmente la eficiencia y desempeño de los algoritmos de control diseñados. En otras palabras, la tecnología de transmisión directa se convierte en una excelente infraestructura o plataforma experimental de calidad para realizar investigación científica en control de robots.

En la figura 2.12 se muestran los componentes ferromagnéticos de cons-

trucción de un motor de transmisión directa. El par o torque es proporcional a la suma del flujo magnético del magneto permanente del rotor Φ_m y del flujo magnético de las bobinas del estator Φ_c . Un número grande de pequeños dientes insertados en el rotor y estator crean ciclos magnéticos que se incrementan por cada revolución del motor. Debido a que el radio del motor es grande, las fuerzas tangenciales entre el rotor y el estator producen un torque adicional.

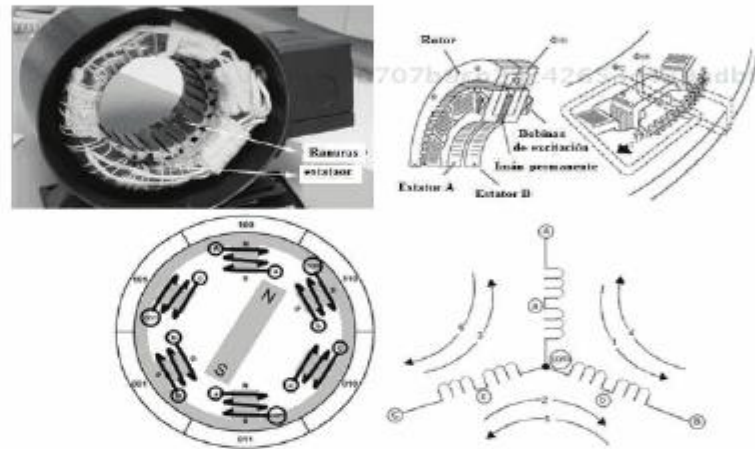


Figura 2.12 Estructura del motor de transmisión directa.

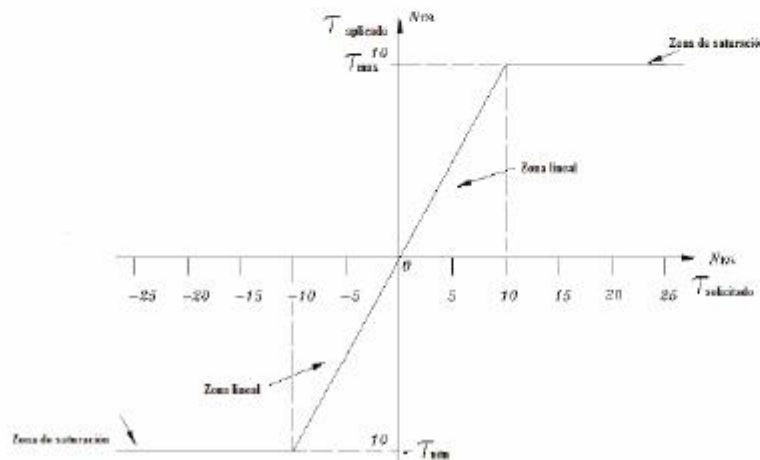
6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebruary

Un servomotor de transmisión directa es una fuente de par, es decir, el par que proporciona como salida se mantiene en magnitud y signo independientemente de la carga que desplace.

Un servomotor no puede proporcionar un par de magnitud infinita, en la práctica la respuesta se encuentra acotada por sus límites físicos.

La figura 2.13 muestra la respuesta de un servomotor de par aplicado τ_{aplicado} en función del $\tau_{\text{solicitado}}$. La respuesta del servomotor se ubica en el primer y tercer cuadrante. Existen dos regiones de trabajo; por ejemplo, para el primer cuadrante se tiene la **zona de saturación** y la **zona lineal**. La zona de saturación representa el límite máximo que el servomotor puede proporcionar, que en el caso de la figura 2.13 es de

10 Nm. La zona de saturación ocurre cuando el par solicitado excede al límite físico o par máximo, es decir $\tau_{solicitado} > \tau_{max}$. En este caso el par entregado es $\tau_{aplicado} = \tau_{max}$. La zona lineal es cuando $\tau_{solicitado} < \tau_{max}$, entonces $\tau_{aplicado} = \tau_{solicitado}$. De manera análoga se procede para el tercer cuadrante, en el cual hay que considerar el signo negativo tanto del par aplicado como del par solicitado.



6707b9cb23c42653e439edb57461d757 ebrary

Figura 2.13 Zona lineal y de saturación de un servomotor.

Matemáticamente la respuesta del servomotor queda específica por la función que a continuación se describe:

$$\tau_{aplicado} = \begin{cases} \tau_{max} & \text{si } \tau_{solicitado} > \tau_{max} \\ \tau_{solicitado} & \text{si } \tau_{min} \leq \tau_{solicitado} \leq \tau_{max} \\ \tau_{min} & \text{si } \tau_{solicitado} < \tau_{min} \end{cases} \quad (2.2)$$

Es recomendable que el servomotor trabaje siempre en la región lineal, debido a que la zona de saturación significa que el par solicitado es mayor que los límites físicos del servo, causando vibración mecánica, dinámica no modelada y juego mecánico, además de que la velocidad de rotación tendría una magnitud superior al ancho de banda. Por tanto es clave diseñar estrategias de control con acciones acotadas en los límites físicos del servomotor.

Por otro lado, también influye la velocidad de rotación del servomotor la

6707b9cb23c42653e439edb57461d757 ebrary ALFAOMEGA

cual deberá permanecer dentro de su ancho de banda (véase figura 2.14). Trabajar el servomotor en la zona lineal y dentro de su ancho de banda son condiciones necesarias para que éste funcione como fuente de par. El ancho de banda de un servomotor es el número de revoluciones por segundo que puede girar (velocidad rotacional \dot{q}) para mantener el par aplicado. Fuera de ese límite el par cae en magnitud y por lo tanto se pierde la ventaja de funcionar como fuente de par.

En la figura 2.14 se muestra el ancho de banda de varios modelos de servomotores de transmisión directa de la compañía Parkercompumotor. Obsérvese que para el modelo DM1200A con capacidad de 200 Nm se tiene un ancho de banda muy reducido: 0.12 rps o 43.2°/seg; si el servomotor llegará a tener una velocidad de rotación mayor a ese límite, por ejemplo 180°/seg, entonces el par aplicado del servomotor decae de 200 Nm a 120 Nm. Para el modelo DM1050A el ancho de banda es de 0.5 rps o 180°/seg.

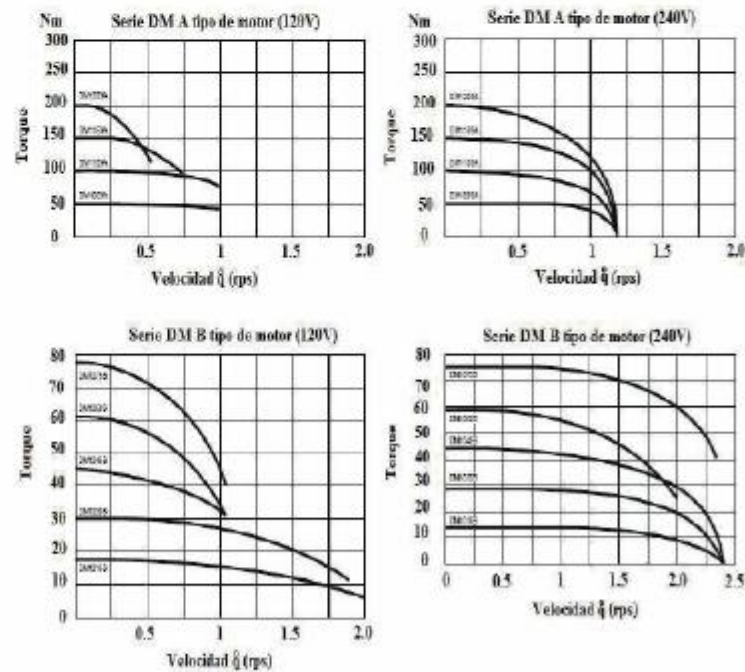


Figura 2.14 Ancho de banda de servomotores de transmisión directa.

En la tabla 2.1 se presenta una comparación cualitativa entre un servomo-

tor de transmisión directa y uno con escobillas (*brush*), mientras que en la tabla 2.2 se muestra el resumen de diversos modelos de servomotores de transmisión directa, resaltando la resolución del encoder, peso, máximo rango de velocidad, capacidad en torque o par aplicado, desempeño, etc.

Actualmente los servomotores de transmisión directa se encuentran en la tercera generación (DrvGIII) y se les denomina como *intelligent drive*; representan una mejora sustancial en desempeño y características con respecto a las versiones anteriores. Ahora incluyen un ambiente de programación para configurar el modo de trabajo. Dicho ambiente facilita la configuración de trabajo en modo par, el cual proporciona que el servomotor funcione como fuente de par, requisito necesario para implementar nuevas estrategias de control.

En la figura 2.15 se muestran las versiones DrvGIII y DrvGII de los servomotores de transmisión directa de la compañía Parkecompumotor.



Figura 2.15 Tercera y segunda generación de servomotores de transmisión directa.

Tabla 2.1 Análisis comparativo entre un servomotor de transmisión directa y uno de escobillas.

Características	Servomotor de transmisión directa	Servomotor con escobillas (<i>brush</i>)
Comutación	Electrónica con retroalimentación de sensores de posición	Comutación por escobillas
Mantenimiento	No requiere	Mantenimiento periódico
Relación velocidad/torque	Mantiene el torque dentro del ancho de banda	Ancho de banda muy limitado; cuando la velocidad aumenta, el fenómeno de fricción reduce el torque por las escobillas
Eficiencia	Alta	Moderada
Inercia del rotor	Inercia baja; debido al imán permanente del rotor mejora la respuesta dinámica	Inercia muy alta que reduce la respuesta dinámica
Juego mecánico	No	Si
Generación de ruido eléctrico	Muy bajo	Alto, debido a la generación de arcos eléctricos por las escobillas
Costos de fabricación	Alto	Bajo
Control	Arquitectura abierta: robusto y eficiente	Arquitectura cerrada: esquemas de control tradicionales PD y PID
Fricción	Muy baja	Muy alta por las escobillas
Fuente de par	Fuente ideal	No funciona como fuente de par

A continuación se presentan los aspectos tecnológicos y operativos de los sensores de posición que vienen insertados en el robot.

Tabla 2.2 Datos técnicos de servomotores de transmisión directa.

Características	Indicador	DM1050A	DM1004C
Desempeño	■ Repetitividad	■ ± 2 arc-seg (0.00055°)	■ ± 2 arc-seg (0.00056°)
	■ Precisión	■ ± 25 arc-seg (0.0089°)	■ ± 60 arc-seg (0.016662°)
Alimentación	■ Volts	■ 110/220 VAC, 50/60 hz	■ 110/220 VAC, 50/60 hz
	■ Rango	■ 10% a 15%	■ 10% a 15%
	■ Corriente	■ 20 A max.	■ 5 A max.
Torque	Par máximo	50 Nm	4 Nm
Entrada analógica	Comando	$\pm 10V$	$\pm 10V$
Peso		14.5 Kg	3 Kg

2.3 Sensores

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

En robótica los sensores de posición más utilizados son los potenciómetros, tacómetros, resolvers y encoders. Sin embargo, la naturaleza analógica de los potenciómetros, así como problemas de temperatura, precisión y no linealidad los hacen poco atractivos e inconvenientes. Además, el tacómetro y el resolver no son viables por su tamaño y peso. El tacómetro proporciona información de la velocidad, y es posible obtener la posición por medios de integración numérica. Por otro lado, los resolvers no tienen adecuada resolución y pierden competencia ante la tecnología optoelectrónica de los encoders.

A continuación se describen los principales sensores de posición en robótica.



2.3.1 Resolvers

Un resolver es un dispositivo sensor que mide el desplazamiento articular (posición angular o lineal) integrado dentro de los servomotores. El resolver está acoplado mecánicamente a la flecha o rotor del servomotor y proporciona como señal de salida un voltaje analógico proporcional a la posición de desplazamiento articular.

La figura 2.16 muestra el esquema general de un resolver. Obsérvese que la estructura mecánica es muy similar a la de un motor.

Un resolver está formado por un estator, un rotor y un transformador giratorio sin escobillas (*brushless resolver*). La generación de flujo magnético distribuido en forma de onda senoidal realiza el movimiento de rotación entre el rotor y el estator; la respuesta de salida es un voltaje senoidal analógico.

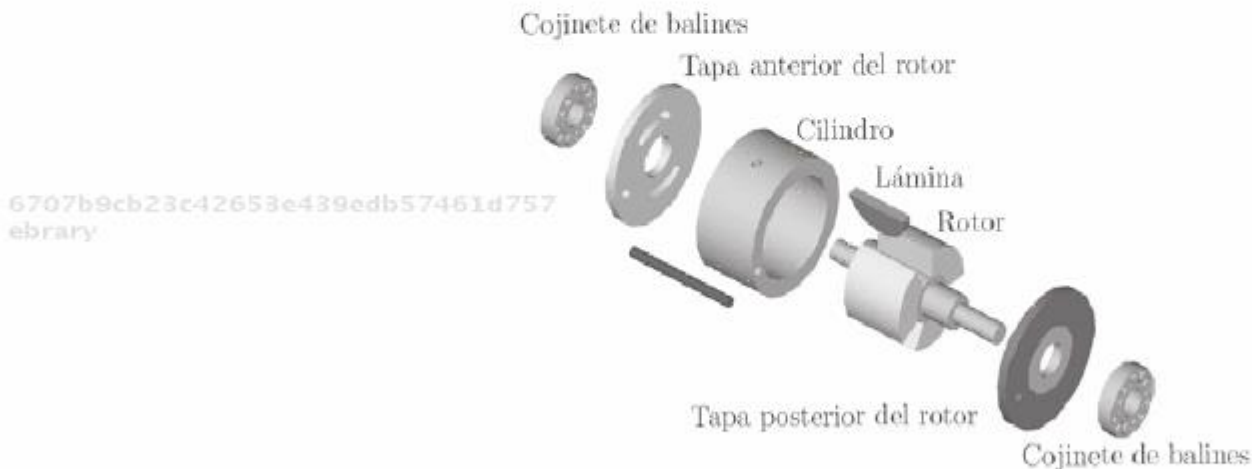


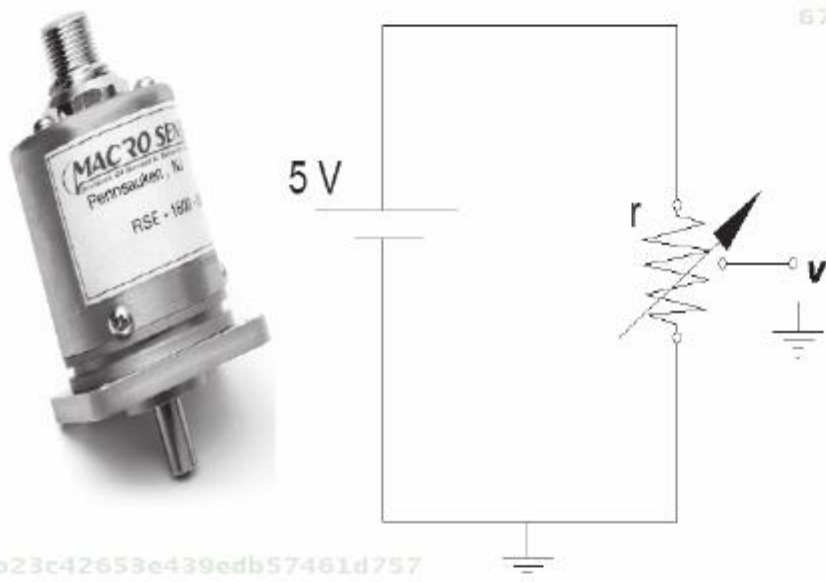
Figura 2.16 Resolver: sensor de posición analógico.

Actualmente, el empleo del resolver como sensor de posición en robots manipuladores es cada vez poco frecuente, debido a sus características analógicas, volumen y peso, lo que se convierten en desventajas.



2.3.2 Potenciómetros

Generalmente, los potenciómetros son dispositivos eléctricos que se emplean como divisores de voltaje para medir la posición o desplazamiento articular de los servomotores. La respuesta de salida representa la posición absoluta del rotor y son calibrados con base en el número de vueltas que puedan realizar. En la figura 2.17 se muestra el esquema básico de un potenciómetro como divisor de voltaje.



6707b9cb23c42653e439edb57461d757

ebrary

6707b9cb23c42653e439edb57461d757

ebrary

Figura 2.17 Potenciómetro como sensor de posición.

Los potenciómetros son resistencias variables fabricadas con un sustrato o película delgada de material resistivo. Un pivote o cursor está acoplado mecánicamente al potenciómetro para que pueda ser desplazado a lo largo de la superficie de la película resistiva, de tal forma que el valor de la resistencia cambia proporcionalmente a la distancia recorrida y de esta manera el voltaje de salida cambia proporcionalmente al desplazamiento articular del servomotor.

Dentro de las **ventajas** que presentan los potenciómetros se encuentran

6707b9cb23c42653e439edb57461d757

ebrary

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS

ALFAOMEGA

que son dispositivos muy populares, es decir, ampliamente documentados, no son costosos, ni requieren acondicionamiento especial de la señal de respuesta. Entre las **desventajas** se tienen sus limitaciones de precisión debido a las fluctuaciones de la temperatura. Por lo general tienen un rango de variación grande que puede ir hasta el 30%, lo cual depende de la calidad del sustrato y materiales de fabricación. Otros aspectos que afectan a los potenciómetros son las vibraciones mecánicas y el uso continuo, puesto que desgastan y degradan sus características como sensor de posición.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

2.3.3 Tacómetro

Los tacómetros son dispositivos acoplados mecánicamente al servomotor y proporcionan un voltaje proporcional a la velocidad de giro del rotor. La técnica común es colocar un magneto sobre la flecha rotatoria. Cuando el magneto gira y pasa por una bobina, entonces se induce corriente proporcional a la velocidad angular; cada rotación de la flecha genera un pulso en la bobina. El periodo de rotación t se puede determinar midiendo el tiempo entre pulsos, por lo tanto la frecuencia f se obtiene como el inverso del periodo, $f = \frac{1}{t}$. En la figura 2.18 se muestran algunos ejemplos de tacómetros.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

La posición del servomotor puede obtenerse por integración numérica de la velocidad proporcionada por el tacómetro, por ejemplo:

$$q_k = q_{k-1} + h\dot{q}_k,$$

donde q_k es la posición en tiempo de muestreo k -ésimo, q_{k-1} es la posición en el tiempo de muestreo k -ésimo-1 o muestreo anterior, h es el periodo de muestreo y \dot{q}_k es la velocidad del rotor en el tiempo de muestreo k -ésimo.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Figura 2.18 Tacómetros.

2.4 Encoders

Los sensores digitales de posición que emplean los robots son encoders contruidos con tecnología optoelectrónica y se les denominan encoders ópticos los cuales a su vez se clasifican en *incrementales* y *absolutos*.

Un encoder óptico consta básicamente de una fuente de luz conformada por un arreglo de diodos LEDs que se encuentran enfrente de un disco giratorio con ranuras. En la parte posterior de este disco se coloca una tarjeta con rendijas que hacen la función de guía de luz. La posición de las rendijas sirve como código de la luz para ser detectada por elementos fotosensibles. El disco giratorio está acoplado en el rotor del servomotor para que gire de la misma forma y por lo tanto el encoder óptico produce como señal de salida un tren de pulsos proporcional al ángulo de giro del rotor.

En la figura 2.19 se muestra un ejemplo de un encoder óptico. Los diodos LED como fuente de luz emiten rayos infrarrojos con longitud de onda $\lambda=7000 \text{ \AA}$ que pasan por las ranuras del disco giratorio hacia la tarjeta

con rendijas que codifica los haces de luz y los guía hacia la etapa de fototransistores o fotodiodos que se encuentran en el respaldo de esta tarjeta, lo que genera una onda cuadrada digital que se acopla directamente a un microprocesador o interfaz electrónica de un sistema mínimo para ser empleada por algoritmos de control.

Las ranuras se encuentran en el disco giratorio y se colocan de tal forma que la luz incida directamente sobre los elementos fotosensibles. Al girar el disco interrumpe el haz de luz, cambiando de estado la salida, de ahí que al disco se le conozca como *disco fotointerruptor* o configuración en *interruptor de haz de luz*.

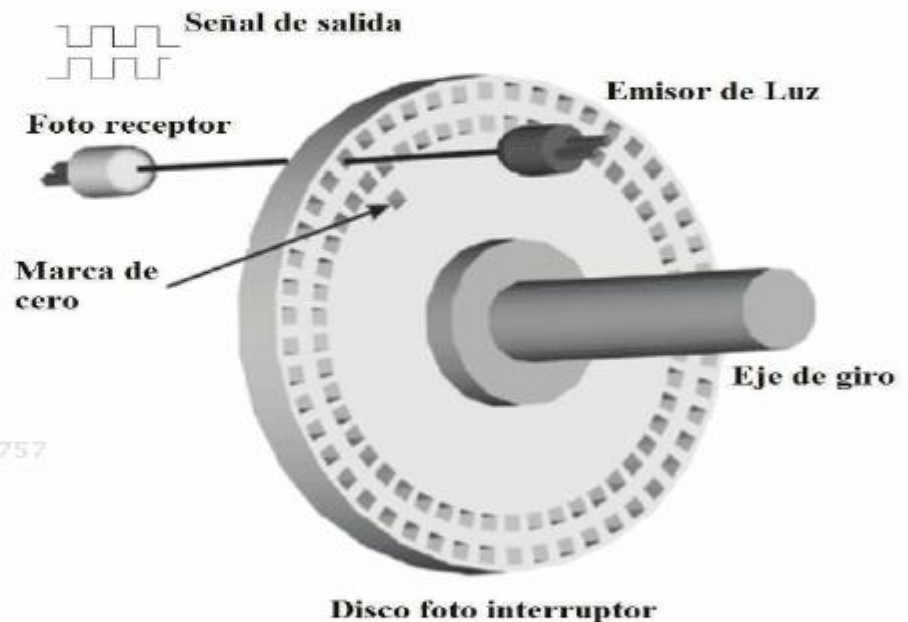


Figura 2.19 Sensor de posición optoelectrónico (encoder óptico).

Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la luz emitida por los diodos LED varía con la temperatura: la pendiente de la luz de los diodos LED se declina conforme aumenta la temperatura, y el método más común para compensar esta caída es colocar dos sistemas con dispositivos fotosensibles y producir una señal teniendo una diferencia de fase eléctrica de 180

grados, luego esta señal es procesada por un comparador electrónico para obtener una onda rectangular estable como respuesta de salida.

Algunos encoders en lugar de usar orificios o ranuras emplean dibujos negros codificados sobre el disco giratorio; en este caso el disco es de un material transparente y tiene la apariencia de un negativo de fotografía. En la figura 2.20 se muestran algunos padrones típicos empleados en encoders ópticos. Estos padrones codificados pueden realizarse por medio de programas CAD como AutoCad, CATIA y SolidWorks.

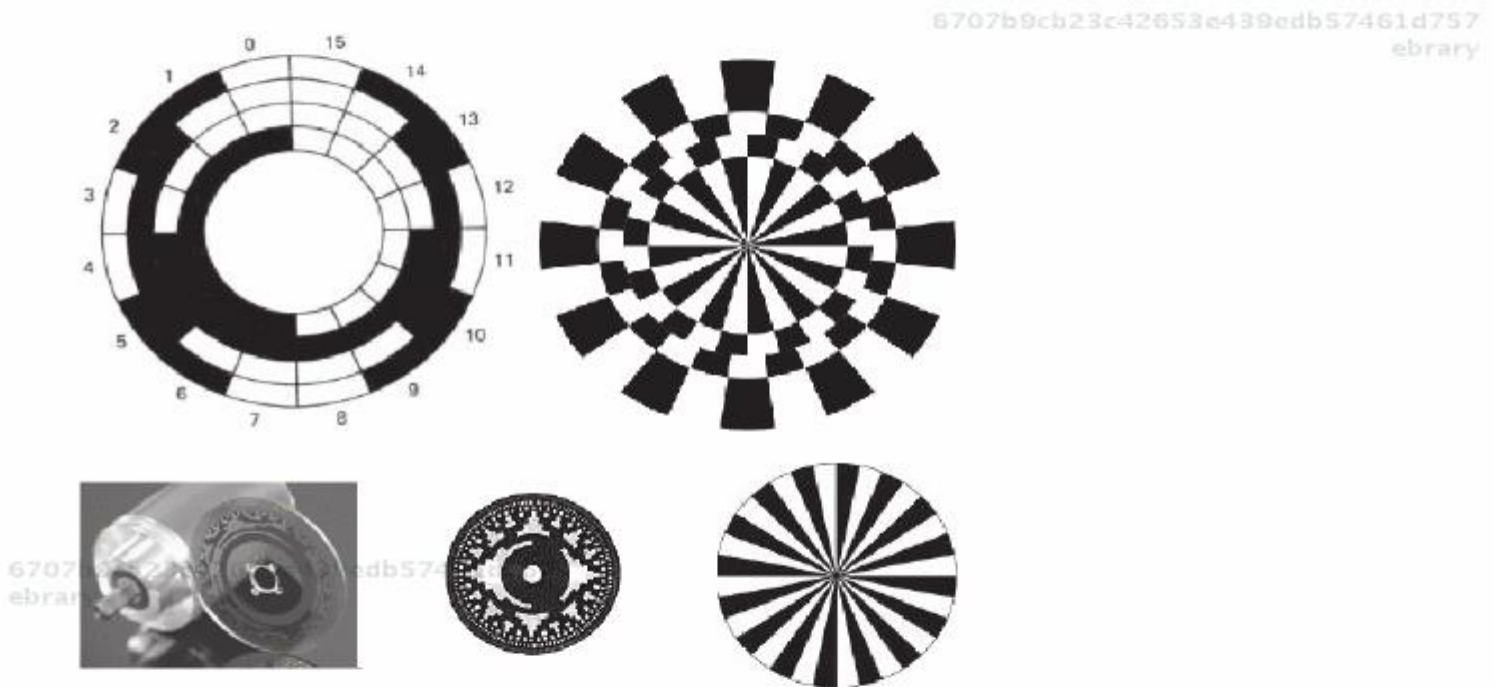


Figura 2.20 Ejemplos de patrones de encoders codificados.

Otra forma de codificar encoders es a través del uso de marcas o franjas reflectivas montadas sobre el disco giratorio, las cuales son figuras concéntricas en blanco y negro. El disco será iluminado por un fotodiodo LED que emite luz infrarroja; al girar el disco, la luz es reflejada por las franjas reflectivas (color blanco) hacia el fototransistor y es interrumpido por los segmentos con franjas negras, lo que causa que el fototransistor conmute y produzca un tren de pulsos como salida directamente pro-

porcional al desplazamiento rotacional del servomotor. El montaje de los fotodispositivos es complejo debido a que requieren de un espacio adecuado para ser instalados sobre el disco giratorio, el cual también deberá ser acoplado a la flecha del motor y no obstruir el movimiento del disco.

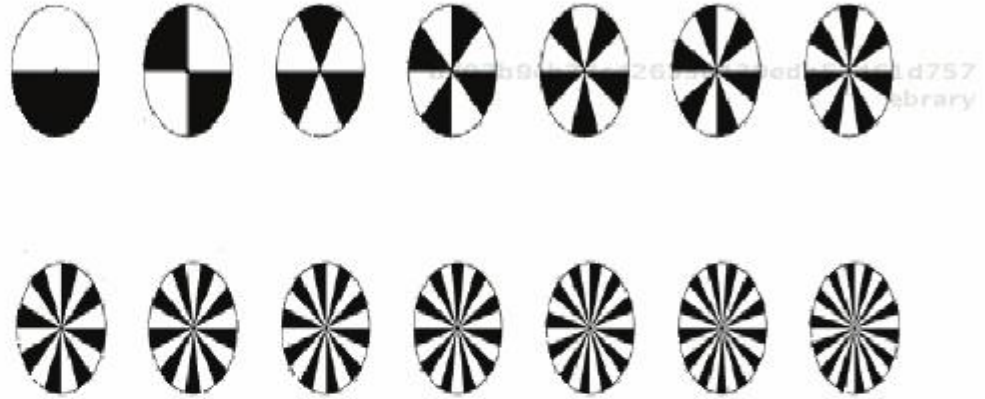


Figura 2.21 Franjas reflectivas para encoders ópticos.

La resolución del encoder está determinada en función de los ciclos por revolución (*CPR*). Entre más alta sea la resolución mucho mejor será la calidad del encoder. Para el caso de encoders que usan franjas reflectivas se tiene que las rayas negras sobre el disco son mucho más pequeñas, lo cual representa dificultades para el fototransistor para diferenciar entre las marcas blancas y las negras, por lo que pueden ocurrir errores en la señal de salida. La alta resolución mejora la exactitud del encoder, lo que significa que el encoder puede ser muestreado a mayor frecuencia, y el sistema de control es capaz de responder más rápido y con mayor exactitud.

Las siguientes son algunas ventajas que representa usar encoders ópticos:



Alta resistencia a las condiciones ambientales tales como humedad, vibraciones e impactos.



Se pueda usar en un rango amplio de temperaturas.



Capacidad de transmitir señales a grandes distancias.



Miniaturizable o tamaño apropiado para las características del servomotor.



Alta resolución en la lectura de la posición a medir.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



2.4.1 Encoder incremental

El encoder incremental también se conoce como *encoder relativo*. En la figura 2.22 se muestra un encoder incremental en la configuración de interruptor de haz de luz. Enfrente del disco giratorio se encuentra el arreglo de diodos LED cuya luz emitida pasa a través de las ranuras del disco rotatorio; los rayos resultantes pasan por las rendijas A, B y Z para ser detectados por los elementos fotosensibles. La luz que pasa por las rendijas A y B tiene una diferencia de fase de 90 grados. La salida es una onda rectangular con la misma diferencia de fase de 90 grados.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

La salida del encoder incremental son pulsos que son proporcionales al ángulo de rotación. Por cada fracción de desplazamiento rotacional en la flecha del servomotor, el encoder incremental cambia su salida de bajo hacia alto o viceversa. La posición medida por el encoder es relativa a la última posición o posición anterior, por eso el encoder incremental se conoce también como encoder relativo. Los pulsos no representan el valor absoluto de la posición, en tal caso el valor absoluto de la posición viene dado por acumular los pulsos de salida; la contabilidad de esos pulsos se lleva a cabo por un circuito electrónico contador de pulsos.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary
ALFAOMEGA

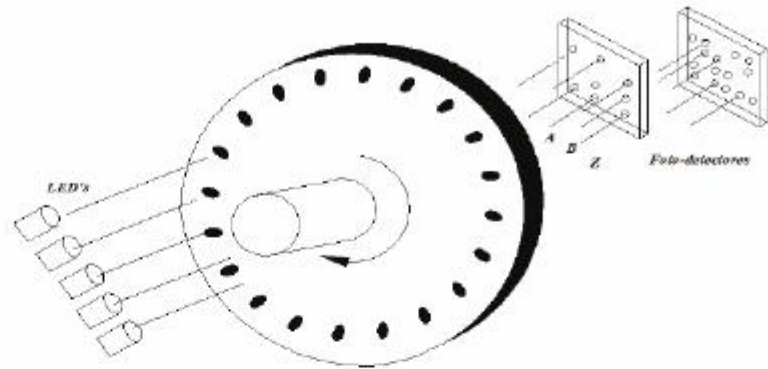
6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Figura 2.22 Encoder óptico con índice Z.

Una forma de mejorar el desempeño de los encoders incrementales que emplean franjas reflectivas es a través de los encoders de cuadratura. La mejora consiste en dos aspectos: primero proporciona la dirección de rotación o sentido de giro del movimiento, es decir, indica si el desplazamiento rotacional tiene dirección negativa (en el sentido del giro de las manecillas del reloj) o positiva (en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj); esto es importante para detectar el signo del error de posición. La segunda mejora se encuentra en duplicar la resolución, puesto que dos estados son generados por cada marca del encoder, por lo tanto se dispondrá de mayor exactitud en el posicionamiento.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Los encoders de cuadratura también pueden usar dos sensores arreglados sobre el disco giratorio, de tal forma que cuando un sensor detecta el límite blanco-negro de la franja causará un cambio de estado, el otro sensor estará exactamente en medio de la otra marca, lo que asegura que responderá con un estado estable conforme el primer sensor cambie de estado. La salida resultante de cada sensor estará fuera de fase 90 grados. En la figura 2.23 se ejemplifica el arreglo del encoder incremental de cuadratura y las formas de onda de los sensores A y B. Una marca negra produce un pulso alto en la salida del sensor (una transición de bajo hacia alto). Una marca blanca produce una salida en bajo (transición de alto

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

hacia abajo). Conforme el disco se mueva en dirección de las manecillas del reloj, si B cambia de alto hacia abajo, después A cambiará de alto hacia bajo, o si B cambia de bajo hacia alto, después A cambiará de bajo hacia alto.

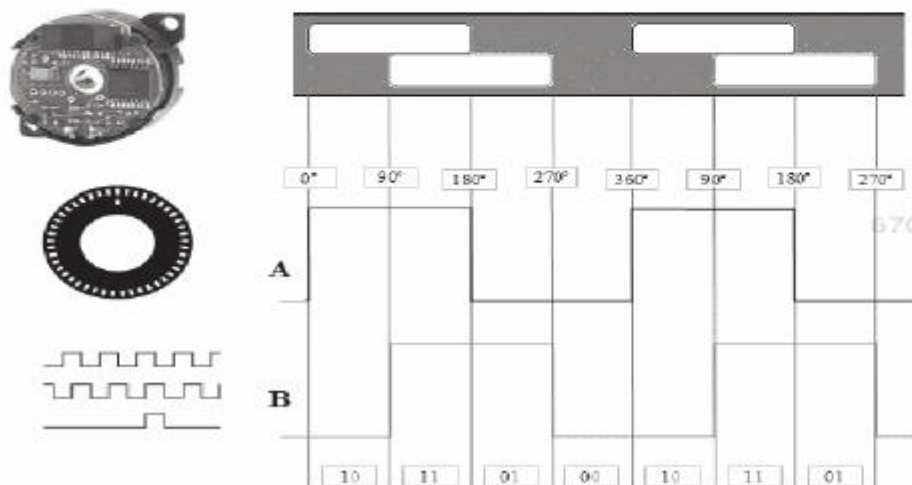


Figura 2.23 Encoder de cuadratura.

Deben considerarse las siguientes características para usar un encoder incremental

- ⚡ Es necesario tomar precauciones sobre el ruido de la señal del encoder, ya que se acumula el ruido en el contador.
- ⚡ Cuando la fuente de alimentación se desconecta, es imposible mostrar la posición previa, aun si inmediatamente se conecta la fuente.

Los encoders incrementales tienen dos canales A y B que están fuera de fase 90 grados, de esta forma es posible determinar la dirección de giro. Hay también un canal opcional llamado canal Z cuya salida proporcionará un pulso por cada 360 grados. La utilidad de este canal consiste en detectar el número de vueltas que realiza; además de que también es

usado como índice de referencia para ajustar el servomotor a la posición cero (*posición de casa*) o al punto inicial.

En la figura 2.24 se presentan datos técnicos de un encoder incremental de la compañía Bourns. Este encoder tiene una resolución modesta: $360^\circ/256=1.406$ grados, lo que significa que no puede detectar movimientos menores de 1.406 grados. Un encoder con estas características puede utilizarse en control de robots donde la aplicación no requiera una exactitud menor a esa resolución, de lo contrario el robot no podrá posicionarse en la posición especificada, debido a que la exactitud no se puede mejorar, ocasionando oscilaciones.

Observe que el rango de temperatura de este encoder incremental tiene un amplio rango de -40°C a 125°C , lo que es adecuado para diversas condiciones ambientales.



Datos	Características
Encoder	Incremental
Resolución	256 pulsos/rev
Tipo de salida	Cuadratura
Alimentación	3.5 a 5 VDC
Temperatura	-40°C a 125°C
Fabricante	Bourns

Figura 2.24 Especificaciones técnicas de un encoder incremental.



2.4.2 Encoder Absoluto

El encoder absoluto, como su nombre lo indica, detecta la posición absoluta de desplazamiento del servomotor. La salida del encoder absoluto son códigos binarios digitales que se pueden encontrar en formato de código binario decimal (binary-coded decimal, BCD) o en código binario cíclico

(gray code). Debido a que la salida del encoder absoluto está en código binario, éste no acumula errores como sucede con el encoder incremental. El encoder absoluto puede medir la posición en cualquier punto de una rotación completa, sin perder la posición previa.

La estructura básica del encoder absoluto es la misma del encoder incremental en configuración fotointerruptor o en patrones codificados. En la figura 2.25 se muestra el patrón de ranuras del disco giratorio.

El número de ranuras determina el número de bits y se encuentran conformadas en bandas de círculos concéntricos distribuidos desde el perímetro hasta el centro del disco giratorio formando un patrón codificado. Los círculos más grandes representan los bits menos significativos, y los círculos más cercanos al centro del disco son los bits más significativos.

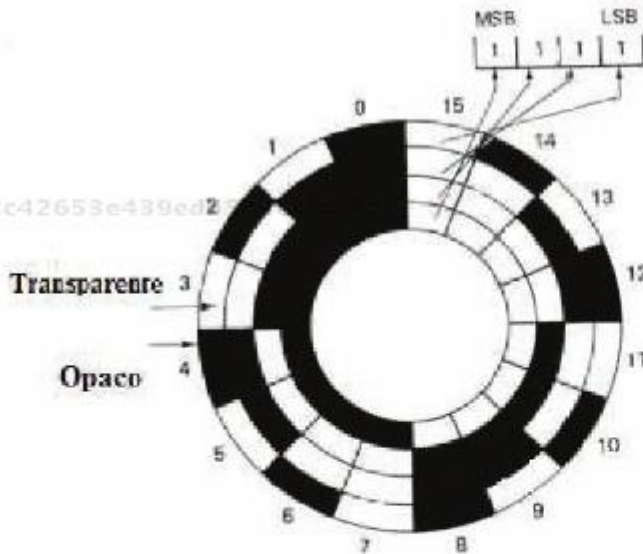


Figura 2.25 Encoder absoluto.

Tabla 2.3 Señal de salida del encoder absoluto.

Número	BCD
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001
10	1010
11	1011
12	1100
13	1101
14	1110
15	1111

La desventaja del encoder absoluto radica en la dificultad de fabricarlo en tamaño miniatura y producirlo a bajo costo. El número de cables en la señal de salida se incrementan en función directa del número de bits. La principal ventaja es que no pierde la posición previa si la fuente de alimentación se desconecta, es decir, siempre detecta el valor de la posición correcta en función del tiempo.

Una comparación entre el encoder absoluto con el incremental radica principalmente en su tamaño. El encoder absoluto aumenta su volumen en forma proporcional con el número de bits, lo que se traduce en cableado. En contraste, la salida del encoder incremental es una serie de pulsos y el conector que proporciona la información de la posición no interviene en aumentar el volumen. En la actualidad los encoders incrementales son

los que más se emplean en robótica.

En la figura 2.26 se presentan datos técnicos de un encoder incremental de la compañía Honeywell S & C. Obsérvese que la resolución se encuentra indicada como 4 CPR y que está limitado a girar 30 rpm, lo cual significa que no puede girar más allá de 10,800 grados.



Datos	Características
Encoder	Absoluto
Resolución	4 CPR
Velocidad máx	30 rpm
Tipo de salida	Código gray
Fabricante	Honeywell S & C

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Figura 2.26 Especificaciones técnicas de un encoder absoluto.



2.4.3 Encoder magnético

Los métodos no ópticos de monitoreo de posición de servomotores tienen la ventaja de ser inmunes al ruido creado por la luz de los diodos LED. Por otro lado, los sensores puramente mecánicos tienen baja exactitud y un tiempo de vida corto debido a la degradación continua en sus componentes mecánicas. El empleo de la teoría electromagnética representa una opción diferente a la optoelectrónica para el diseño de encoders.

Los encoders magnéticos constan de una resistencia magnética colocada sobre el perímetro o a un costado del disco magneto. En la figura 2.27 se muestra un disco y una resistencia magnética colocados en sus dos formas posibles. Una forma de colocación consiste en poner a la resistencia magnética sobre una de las caras exteriores del disco para magnetizar el círculo exterior del disco. La otra forma posible es magnetizar uno de los

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary
ALFAOMEGA

ROBÓTICA. CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES - FERNANDO REYES CORTÉS

ALFAOMEGA

lados del disco para colocar una resistencia magnética sobre el perímetro del disco.

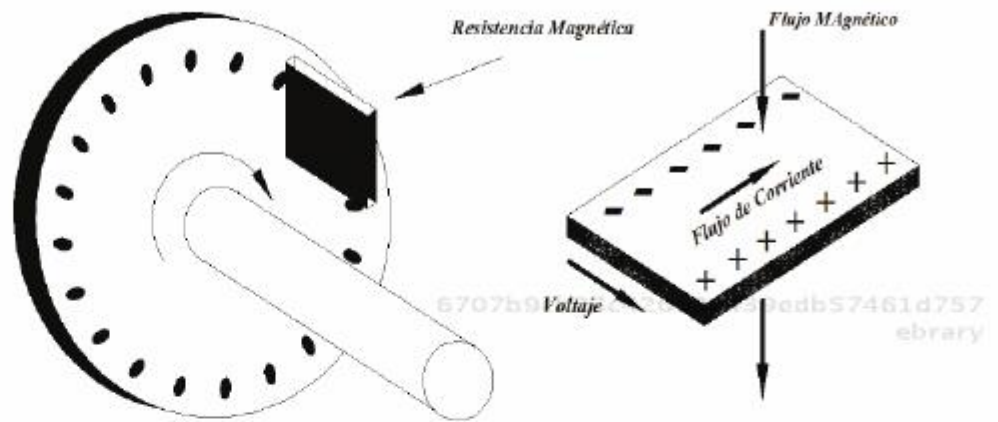


Figura 2.27 Encoder magnético.

La resistencia magnética es un transductor que convierte el campo magnético en corriente eléctrica, y cuya resistencia eléctrica varía en función de la intensidad del campo magnético aplicado. La resistencia magnética tiene una resistencia r cuando la corriente i fluye en dirección de la flecha (véase la figura 2.27), r disminuye cuando el campo magnético H es aplicado en ángulo recto a la dirección de la corriente i . Con esto es posible obtener una señal de salida correspondiente a la rotación del rotor por colocar la resistencia magnética que corresponda al patrón de magnetización del disco o del tambor.

A este principio se le denomina efecto Hall en honor a Edwin Hall, quien en el año de 1879 descubrió que cuando un conductor transporta carga genera un pequeño voltaje potencial en ángulo recto (transversal) al campo magnético y a la dirección del flujo de corriente, como se muestra en el esquema derecho de la figura 2.27.

La desventaja que presentan los encoders magnéticos es que funcionan incorrectamente en ambientes donde existen problemas electromagnéticos o flujo magnético, ya que contaminan la respuesta del encoder magnético.

Es necesario tomar precauciones para aislar niveles de ruido ambiental, lo cual puede lograrse utilizando malla protectora o cable trenzado.



2.4.4 Aspectos importantes de los encoders

La selección de encoders ópticos depende de la aplicación específica. Sin embargo, es conveniente tomar en cuenta las siguientes consideraciones: resolución y precisión de la posición; tamaño del encoder para propósitos de acondicionamiento mecánico, de tal forma que el rotor del servomotor permita acoplamiento mecánico; diferencia de fase de la salida; sensibilidad al medio ambiente, cambios climáticos, polvo, condensación de agua (lugares húmedos o cálidos). Cuando el nivel de la salida es compatible con TTL, *lógica transistor a transistor (transistor-transistor logic)*, la fuente de voltaje por lo general es 5 volts, por lo que la salida es fácilmente afectada por ruido ya que son contaminados en lugares donde hay ruido ambiental; en este caso se deberá incorporar circuitos aisladores de ruido. En acoplamientos mecánicos las flechas del encoder y del rotor deberán estar bien alineadas, la flecha del rotor no deberá estar desbalanceada, ya que degrada la exactitud y acorta la vida del encoder. Es importante destacar que la vibración de máquinas se transmite a la flecha de servomotor y puede producir pulsos de salida del encoder cuando no hay movimiento.

Los encoders incrementales son de bajo precio; no registran la posición absoluta después de que la fuente de alimentación ha sido desconectada, por lo tanto pueden utilizarse en aplicaciones donde la pérdida de energía no es importante. Los encoders incrementales son adecuados para la mayoría de las aplicaciones ya que pueden rotar y producir pulsos como sea necesario, siempre y cuando tengan la instrumentación electrónica para almacenar y contabilizar números muy grandes. En contraste, los encoders absolutos con código binario o código gray pueden leer la posición dentro de una rotación y por lo tanto no son adecuados para múltiples rotaciones. El encoder óptico incremental genera pulsos por rotar el disco

giratorio entre la luz que emiten los diodos LED y la luz que reciben los elementos fotosensibles. La salida serán pulsos que sirven para determinar el desplazamiento articular. A la cantidad total de pulsos para obtener el desplazamiento a través de un encoder incremental se le denomina odometría (*odometry*).

Hay que tener cuidado de seleccionar un número alto de pulsos por revolución, ya que esto significa alta exactitud y resolución. No siempre es la mejor opción la selección de encoders con un número alto de pulsos por revolución, puesto que esto implica un mayor precio y altas frecuencias en las salidas para una velocidad dada en el rotor del servomotor. La gran mayoría de los encoders están limitados a 100 khz en su frecuencia de salida.

Los encoders magnéticos son operados por flujo magnético, por lo tanto cuando se emplean en lugares donde hay fenómenos electromagnéticos tienen mal funcionamiento, por tanto se deben tomar en cuenta consideraciones como niveles de ruido ambiental y seleccionar alambres eléctricos trenzados con blindaje especial o malla protectora de ruido para transmitir señales a grandes distancias. El encoder magnético y el encoder óptico tienen el mismo principio para la producción de la señal de salida, no obstante tienen diferente estructura interna como detectores de posición.

Es común el empleo de los encoders ópticos (incrementales y absolutos) y los encoders magnéticos para obtener señales de velocidad, la técnica más usada es conocida como diferenciación numérica de la posición (método de Euler), por ejemplo si q_k representa la posición proporcionada por el encoder en el estado de muestro k -ésimo y q_{k-1} es la posición en el estado de muestreo k -ésimo anterior, entonces la velocidad de movimiento del rotor \dot{q}_k está dado por $\dot{q} = \frac{q_k - q_{k-1}}{h}$, donde h es el periodo de muestreo.

Matemáticamente también es posible obtener la velocidad \dot{q} mediante un sistema dinámico lineal de primer orden. Por ejemplo, considérese el siguiente sistema (*método de filtrado*): $\dot{F}_q = -\lambda F_q + \lambda q$, donde \dot{F}_q

representa la velocidad filtrada, F_q es el estado del filtro y representa la señal filtrada de la posición q y λ es la frecuencia de corte del filtro. El inconveniente de este método es el problema de la fase en la velocidad obtenida \dot{F}_q , lo que significa que tendrá un corrimiento en el tiempo y por lo tanto la velocidad estimada mantendrá un error con respecto a la velocidad ideal.

Esta representación es equivalente a la función de transferencia: $\frac{F_q}{q} = \frac{\lambda}{\lambda + s}$, donde $s = jw$ siendo $j = \sqrt{-1}$ la unidad imaginaria, $w = 2\pi f$ la frecuencia en rad/seg y f la frecuencia en Hertz.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Otro método empleado es convertir el número de pulsos de salida a una señal analógica proporcional a la frecuencia del pulso; para este caso se utiliza un convertidor de frecuencia a voltaje, es decir, $\dot{q} = \alpha \text{ voltaje}$, donde α es una constante de proporcionalidad.



2.4.5 Construcción de un encoder incremental

En esta sección se describen el diseño y la construcción de un encoder incremental que puede ser acoplado en la flecha o rotor de un servomotor. La gran mayoría de los encoders comerciales son relativamente costosos, dependiendo de la precisión y calidad de sus componentes ópticas, sin embargo son fáciles de construir. A continuación se describen los pasos necesarios para construir un encoder incremental sencillo, el cual será fabricado con franjas reflectivas sobre un disco giratorio que será montado sobre la flecha de un motor de corriente directa. Este ejemplo puede aplicarse en control de motores de corriente directa.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary

Diseño y construcción de un encoder incremental

Supóngase que el diámetro del disco giratorio mide 5 cm y que el encoder tiene un total de 16 marcas (8 franjas blancas y 8 franjas negras). La circunferencia de la rueda es $\pi \times 5\text{cm} = 15.707 \text{ cm}$.

6707b9cb23c42653e439edb57461d757
ebrary



Encoder incremental

En la página web del libro se presentan los componentes para construir un encoder incremental con franjas reflectivas. El fotosensor, diagrama esquemático del circuito electrónico, números de serie de los componentes y descripción del funcionamiento del encoder incremental.

Dividiendo el número de marcas dentro de la circunferencia se obtiene 0.98 cm por pulso del encoder, es decir 8 pulsos por cada vuelta completa o cada 360 grados. Entonces, la resolución del encoder está dada como $\frac{360}{8} = 45$ grados.

Es posible duplicar la resolución a 0.49 cm por pulso del encoder duplicando el número de marcas ($\frac{15,707}{32}$), en este caso la resolución está dada por $\frac{360}{16} = 22.5$ grados. Con estas características en la resolución, se tendrían muchos problemas para controlar un servomotor.

Dependiendo de la aplicación, una resolución de milésimas de grado puede ser más conveniente. Sin embargo, para los propósitos del ejemplo se diseñará el disco reflectivo con 32 franjas negras y 32 franjas blancas como se muestra en la figura 2.28; la resolución de este encoder ejemplo es de $\frac{360}{32} = 11.25$ grados.

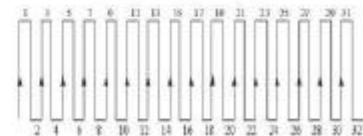
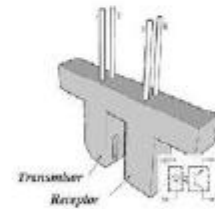
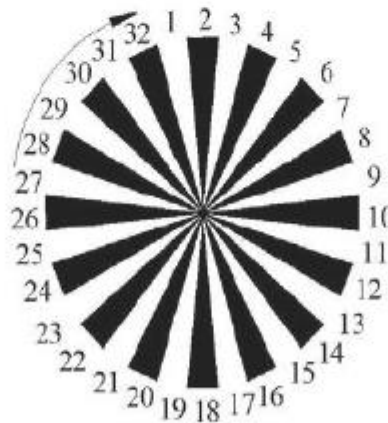


Figura 2.28 Encoder incremental con técnica reflectiva.