

Matjaž Mihelj · Tadej Bajd

Aleš Ude · Jadran Lenarčič

Aleš Stanovnik · Marko Munih

Jure Rejc · Sebastjan Šlajpah

robótica

Segunda edición

robótica

Matjaž Mihelj • Tadej Bajd • Aleš Ude
Jadran Lenarčič • Aleš Stanovnik
Marko Munih • Jure Rejc • Sebastjan Šlajpah

robótica

Segunda edición

123

Matjaž Mihelj
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Liubliana
Liubliana, Eslovenia

Aleš Stanovnik
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Liubliana
Liubliana, Eslovenia

Tadej Bajd
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Liubliana
Liubliana, Eslovenia

marko munih
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Liubliana
Liubliana, Eslovenia

Aleš Ude
Departamento de Automática,
Biocibernética y Robótica
Instituto Jožef Stefan
Liubliana, Eslovenia

Jure Rejc
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Liubliana
Liubliana, Eslovenia

Jadran Lenarčič
Instituto Jožef Stefan
Liubliana, Eslovenia

Sebastjan Šlajpah
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Liubliana
Liubliana, Eslovenia

ISBN 978-3-319-72910-7

ISBN 978-3-319-72911-4 (libro electrónico)

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-72911-4>

Número de control de la Biblioteca del Congreso: 2018946678

1.ª edición: © Springer Science+Business Media BV 2010 2.ª edición: © Springer International Publishing AG, parte de Springer Nature 2019 Este trabajo está sujeto a derechos de autor. Todos los derechos están reservados por el Editor, ya sea total o parcialmente el material, específicamente los derechos de traducción, reimpresión, reutilización de ilustraciones, recitación, radiodifusión, reproducción en microfílm o de cualquier otra forma física, y transmisión o almacenamiento de información. y recuperación, adaptación electrónica, software de computadora, o por metodología similar o diferente ahora conocida o desarrollada en el futuro.

El uso de nombres descriptivos generales, nombres registrados, marcas comerciales, marcas de servicio, etc. en esta publicación no implica, incluso en ausencia de una declaración específica, que dichos nombres estén exentos de las leyes y reglamentos de protección pertinentes y, por lo tanto, libres para uso general. usar. El editor, los autores y los editores pueden asumir con seguridad que los consejos y la información de este libro se consideran verdaderos y precisos en la fecha de publicación. Ni el editor ni los autores o los editores dan garantía, expresa o implícita, con respecto al material contenido en este documento o por cualquier error u omisión que pueda haberse cometido. El editor se mantiene neutral con respecto a los reclamos jurisdiccionales en mapas publicados y afiliaciones institucionales.

Impreso en papel libre de ácido

Este pie de imprenta de Springer es publicado por la empresa registrada Springer International Publishing AG, parte de Springer Nature

La dirección de la empresa registrada es: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Suiza

Prefacio

Quizás sea difícil ponerse de acuerdo sobre qué es un robot, pero la mayoría de las personas que trabajan en robótica probablemente citarían al "padre de la robótica", Joseph F. Engelberger (1925–2015), un pionero en robótica industrial, al afirmar "No puedo definir un robot, pero reconozco uno cuando lo veo".

La palabra robot no se origina en un vocabulario científico o de ingeniería, sino que se utilizó por primera vez en el drama checo "RUR" (Robots universales de Rossum) de Karel Čapek, que se representó por primera vez en Praga en 1921. La palabra en sí fue inventada por su hermano, Josef. En el drama, el robot es un ser humano artificial que es un trabajador brillante, privado de todas las "cualidades innecesarias", como las emociones, la creatividad y la capacidad de sentir dolor. En el prólogo del drama se da la siguiente definición de robots: "Los robots no son personas (Roboti nejsou lidé). Son mecánicamente más perfectos que nosotros, tienen una capacidad intelectual asombrosa, pero no tienen alma. La creación de un ingeniero es técnicamente más refinada que el producto de la naturaleza".

El libro Robótica evolucionó a lo largo de décadas de enseñanza de robótica en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Ljubljana, Eslovenia, donde se publicó el primer libro de texto sobre robótica industrial en 1980 (A. Kralj y T. Bajd, "Industrijska robotika"). La forma de presentar este tema bastante exigente se probó con éxito con varias generaciones de estudiantes de pregrado.

La segunda edición del libro continúa el legado de la primera edición que ganó la distinción de Título Académico Sobresaliente de la revista de la biblioteca CHOICE en 2011. La característica principal del libro sigue siendo su simplicidad. El capítulo introductorio ahora cubre de manera integral diferentes clases de robots con el enfoque principal en los robots industriales. La posición, orientación y desplazamiento de un objeto se describen mediante matrices de transformación homogéneas. Estas matrices, que son la base para cualquier análisis de los mecanismos de los robots, se introducen mediante un razonamiento geométrico simple. Los modelos geométricos del mecanismo del robot se explican con la ayuda de una descripción vectorial original y fácil de usar. Dado que el mundo de la robótica es de seis dimensiones, la orientación de los efectores finales de los robots recibió más atención en esta edición.

La cinemática y la dinámica del robot se introducen a través de un mecanismo con solo dos grados de libertad de rotación, que sin embargo es una parte importante de las estructuras de robots industriales más populares. La presentación de la dinámica del robot se basa únicamente en el conocimiento de la ley de Newton y se simplificó adicionalmente para facilitar la comprensión de este asunto relativamente complejo. El espacio de trabajo juega un papel importante en la selección de un robot apropiado para la tarea planificada. La cinemática de los robots paralelos es significativamente diferente de la cinemática de los manipuladores en serie y merece atención adicional.

Los sensores robóticos presentados en esta edición son relevantes no solo para manipuladores industriales, sino también para sistemas complejos como los robots humanoides. La visión robótica tiene un papel cada vez más importante en las aplicaciones industriales y la planificación de la trayectoria del robot es un requisito previo para el control exitoso del robot. Se explican los esquemas de control básicos, que dan como resultado la trayectoria de punto final deseada o la fuerza entre el robot y su entorno. Los entornos de robots se ilustran mediante procesos de ensamblaje de productos, donde los robots son parte de una línea de producción u operan como unidades completamente independientes. También se describen pinzas robóticas, herramientas y dispositivos de alimentación.

Con el piso de la fábrica cada vez más complejo, la interacción entre humanos y robots será inevitable. Los robots colaborativos están diseñados para una interacción segura entre humanos y robots. La flexibilidad de la producción se puede aumentar aún más con el uso de robots móviles con ruedas. Un vistazo al futuro, cuando los humanos y los robots serán compañeros, se presenta en el capítulo sobre robótica humanoide, cuya complejidad requiere conocimientos matemáticos más avanzados. El capítulo sobre estandarización y medición de precisión y repetibilidad es de interés para los usuarios de robots industriales.

El libro requiere un mínimo conocimiento avanzado de matemáticas y física. Por lo tanto, es apropiado para cursos de introducción a la robótica en las facultades de ingeniería (eléctrica, mecánica, informática, civil). También podría ser de interés para ingenieros que no hayan estudiado robótica, pero que se hayan encontrado con robots en el entorno laboral y deseen adquirir algunos conocimientos básicos de una manera sencilla y rápida.

Contenido

1	Introducción	1
1.1	Manipulador de robots	4
1.2	Robótica Industrial	6
2	Matrices de Transformación Homogéneas	11
2.1	Transformación traslacional	11
2.2	Transformación rotacional	12
2.3	Postura y Desplazamiento	16
2.4	Modelo de robot geométrico	19
3	Descripción geométrica del mecanismo del robot	27
3.1	Parámetros vectoriales de un par cinemático	27
3.2	Parámetros vectoriales del mecanismo	31
4	Orientación	39
5	Robot manipulador de dos segmentos	49
5.1	Cinemática	49
5.2	Estática	54
5.3	Espacio de trabajo	55
5.4	Dinámica	60
6	Robots paralelos	69
6.1	Características de los Robots Paralelos	69
6.2	Arreglos Cinemáticos de Robots Paralelos	73
6.3	Modelado y Diseño de Robots Paralelos	78
7	Sensores robóticos	85
7.1	Principios de detección	85
7.2	Sensores de Movimiento	86
7.2.1	Colocación de sensores	86
7.2.2	Potenciómetro	87

7.2.3 Codificador óptico	88
7.2.4 Codificador magnético	92
7.2.5 Tacómetro	93
7.2.6 Unidad de Medida Inercial	94
7.3 Sensores de contacto	96
7.3.1 Sensor táctil	96
7.3.2 Interruptor de límite y tope	98
7.3.3 Sensor de fuerza y par	98
7.3.4 Sensor de par articular	101
7.4 Sensores de proximidad y distancia	102
7.4.1 Telémetro ultrasónico	102
7.4.2 Telémetro láser y escáner láser	103
8 Visión robótica	107
8.1 Configuración del sistema	107
8.2 Proyección hacia delante	108
8.3 Proyección hacia atrás	113
8.3.1 Cámara única	113
8.3.2 Visión Estéreo	115
8.4 Procesamiento de imágenes	118
8.5 Posición del objeto a partir de la imagen	118
8.5.1 Calibración de la cámara	118
8.5.2 Posición del objeto	120
9 Planificación de la trayectoria	123
9.1 Interpolación de la trayectoria entre dos puntos	123
9.2 Interpolación por uso de puntos vía	126
10 Control de robots	133
10.1 Control del Robot en Coordenadas Internas	134
10.1.1 PD Control de Posición	135
10.1.2 PD Control de Posición con Compensación por Gravedad ...	136
10.1.3 Control del Robot Basado en Dinámica Inversa	137
10.2 Control del Robot en Coordenadas Externas	141
10.2.1 Control basado en la matriz jacobiana transpuesta	142
10.2.2 Control basado en la matriz jacobiana inversa	143
10.2.3 PD Control de Posición con Compensación por Gravedad ...	144
10.2.4 Control del Robot Basado en Dinámica Inversa	144
10.3 Control de la Fuerza de	147
Contacto 10.3.1 Linealización de un Sistema de Robot por Inverso	
Dinámica	148
10.3.2 Control de fuerza	149

11 Entorno del robot	153
11.1 Seguridad de los robots	153
11.2 Periféricos robóticos en procesos de ensamblaje	158
11.2.1 Configuraciones de la línea de producción de ensamblaje	158
11.3 Dispositivos de alimentación	160
11.4 Transportadores	164
11.5 Pinzas y herramientas robóticas	165
12 Robots colaborativos.....	173
12.1 Sistema de Robot Industrial Colaborativo	173
12.2 Robot colaborativo	175
12.3 Operación colaborativa.....	177
12.3.1 Parada supervisada con clasificación de seguridad	178
12.3.2 Guiado manual	178
12.3.3 Monitoreo de Velocidad y Separación	180
12.3.4 Limitación de potencia y fuerza	181
12.4 Pinzas robóticas colaborativas	184
12.5 Aplicaciones del Sistema Robótico Colaborativo	185
13 Robots móviles	189
13.1 Cinemática del robot móvil	190
13.2 Navegación	197
13.2.1 Localización	197
13.2.2 Planificación de rutas	201
13.2.3 Control de ruta	202
14 Robótica Humanoide	209
14.1 Locomoción bípeda 211.....	
14.1.1 Punto de momento cero 211.....	
14.1.2 Generación de patrones de caminata	213
14.2 Aprendizaje por imitación	216
14.2.1 Observación del movimiento humano y su transferencia al movimiento de un robot	217
humanoide 14.2.2 Primitivas de movimiento dinámico	221
14.2.3 Propiedades de convergencia de la dinámica lineal Sistemas	222
14.2.4 Primitivas de Movimiento Dinámico para Punto a Punto Movimientos	223
14.2.5 Estimación de parámetros DMP a partir de un único Demostración	225
14.2.6 Modulación de DMP	227
15 Precisión y repetibilidad de los manipuladores industriales	231
Derivación de la aceleración en movimiento circular	243
Índice	247

Capítulo 1

Introducción



La robótica actual se puede describir como una ciencia que se ocupa del movimiento inteligente de varios mecanismos robóticos que se pueden clasificar en los siguientes cuatro grupos: manipuladores robóticos, vehículos robóticos, sistemas hombre-robot y robots de inspiración biológica (Fig. 1.1). Los manipuladores robóticos que se encuentran con más frecuencia son los mecanismos robóticos en serie. El robot manipulador está representado por una cadena en serie de cuerpos rígidos, llamados segmentos de robot, conectados por articulaciones. Los manipuladores de robots en serie se describirán con más detalle en la siguiente sección de este capítulo. Los robots paralelos son de considerable interés tanto en la ciencia como en la industria. Con estos, la base y la plataforma del robot se conectan entre sí con segmentos paralelos, llamados patas. Los segmentos están equipados con actuadores de traslación, mientras que las juntas en la base y la plataforma son pasivas. Los robots paralelos se utilizan principalmente para tareas de recogida y colocación. Se caracterizan por altas aceleraciones, repetibilidad y precisión. Como los manipuladores robóticos reemplazan al operador humano en varios trabajos de producción, su tamaño suele ser similar al de un brazo humano. Los fabricantes también pueden proporcionar manipuladores robóticos hasta diez veces más grandes, capaces de manipular carrocerías completas. Por el contrario, en las áreas de biotecnología y nuevos materiales se utilizan micro y nanorobots. Los nanorobots permiten empujar, tirar, manipular y colocar, orientar, doblar y ranurar en la escala de moléculas y partículas. El nanomanipulador más extendido se basa en el principio del microscopio de fuerza atómica. El actuador de este nanomanipulador es un cristal piezoeléctrico, cuyo movimiento se evalúa mediante el uso de una fuente láser y una fotocélula.

Los vehículos robot autónomos se encuentran en tierra, en el agua y en el aire. Los robots móviles terrestres se aplican con mayor frecuencia en entornos creados por el hombre, como apartamentos, hospitales, grandes almacenes o museos, pero se pueden encontrar cada vez más en carreteras e incluso en terrenos sin caminos. Sin embargo, la mayoría de los robots móviles se utilizan en terreno llano con el movimiento habilitado por ruedas, con tres ruedas que proporcionan la estabilidad necesaria. A menudo, las ruedas están especialmente diseñadas para permitir movimientos omnidireccionales. Los vehículos robot se pueden encontrar como aspiradoras, cortadoras de césped autónomas, guías inteligentes a través de grandes almacenes o museos, así

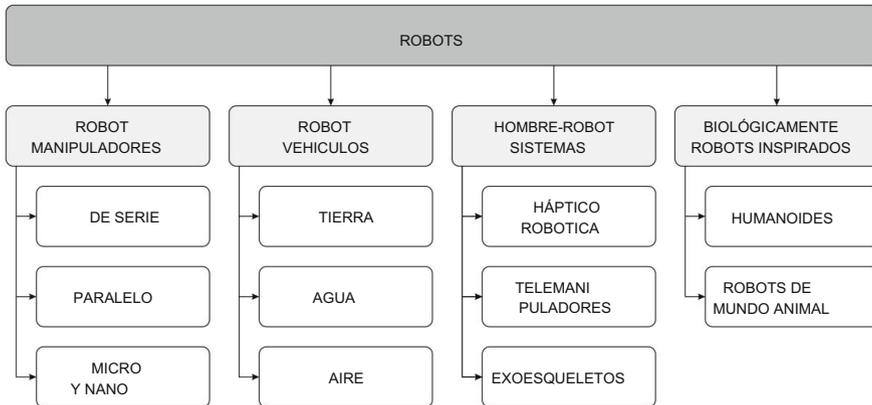


Fig. 1.1 Clasificación de robots

en centros clínicos, rovers espaciales o coches autónomos. Los estudiantes pueden disfrutar aprendiendo en varias competiciones, por ejemplo, fútbol o juegos de rescate, basados en el uso de pequeños robots móviles. Entre los vehículos aéreos, los más populares parecen ser los pequeños cuadricópteros. Tienen una estructura mecánica muy simple lo que los hace comparativamente económicos. Los cuadricópteros vuelan con cuatro rotores y están equipados con sensores como giroscopios, acelerómetros y cámaras, y se utilizan principalmente con fines de vigilancia. Las versiones autónomas más grandes se utilizan para misiones de reconocimiento militar. Los robots a base de agua flotan en la superficie o funcionan bajo el agua.

Las versiones submarinas pueden tener la forma de submarinos autónomos más pequeños. A menudo, pueden equiparse con un brazo robótico y usarse en la investigación oceánica, la observación del lecho marino o los naufragios o como asistentes en plataformas petrolíferas. Los robots flotantes autónomos se utilizan para evaluaciones ecológicas marinas.

Los nuevos conocimientos en el área del control de robots están influyendo fuertemente en el desarrollo de sistemas hombre-robot, como robots hápticos, telemanipuladores y exoesqueletos. El uso de robots hápticos está relacionado con los entornos virtuales que suelen visualizarse en las pantallas de los ordenadores. Los primeros entornos virtuales proporcionaban vista y sonido al observador, pero no el sentido del tacto. Los robots hápticos brindan al usuario la sensación de tacto, movimiento limitado, cumplimiento, fricción y textura en un entorno virtual. Los robots hápticos juegan un papel importante en la robótica de rehabilitación, donde se utilizan pequeños robots hápticos para evaluar y evaluar los movimientos de las extremidades superiores en personas paralizadas. Los sistemas hápticos más fuertes pueden sujetar la muñeca de una persona paralizada y guiar el punto final del brazo a lo largo del camino deseado que se muestra al sujeto en un entorno virtual presentado en la pantalla de la computadora. El robot háptico ejerce dos tipos de fuerzas en la muñeca del sujeto. Cuando el paciente no puede realizar un movimiento a lo largo de la ruta que se le muestra en el entorno virtual, el robot empuja la muñeca a lo largo de la trayectoria requerida y ayuda al paciente a realizar la tarea. El robot está ayudando solo en la medida necesaria para que el paciente alcance el punto de destino. Cuando la extremidad paralizada del paciente se aleja del

curva planeada, el robot empuja la muñeca hacia la vecindad de la trayectoria requerida. Los telemanipuladores son robots controlados por un operador humano cuando existe una barrera entre el telemanipulador y el operador humano. La barrera entre el operador y el entorno de trabajo suele ser la distancia (por ejemplo, el espacio exterior) o la peligrosidad (por ejemplo, dentro de una planta nuclear). Los telemanipuladores también están ingresando al mundo médico, siendo utilizados en cirugía (telemedicina). Los exoesqueletos son mecanismos activos que se adhieren a las extremidades superiores o inferiores del ser humano. Se utilizan principalmente con fines de rehabilitación. Los exoesqueletos de las extremidades inferiores pueden aumentar la fuerza de las personas sanas o permitir el reentrenamiento de las personas paralizadas para caminar. En comparación con los robots de rehabilitación háptica, los exoesqueletos para extremidades superiores ejercen fuerzas en todos los segmentos del brazo paralizado.

Los robots de inspiración biológica se pueden dividir en robots humanoides y robots del mundo animal. Ejemplos del mundo animal son varios tipos de serpientes robóticas, peces, cuadrúpedos, robots andantes de seis u ocho patas. Los robots humanoides son, con diferencia, los sistemas robóticos más avanzados del grupo de los robots de inspiración biológica. Están diseñados para vivir y trabajar en un entorno humano. La propiedad más notable de los robots humanoides es su capacidad de caminar bípedos. Caminan con una marcha estática o dinámicamente estable, pueden equilibrarse mientras están de pie sobre una sola pierna, se mueven de acuerdo con un compañero de trabajo humano, incluso pueden correr. Los problemas actuales de la robótica humanoide están relacionados con la visión artificial, la percepción y el análisis del entorno, el procesamiento del lenguaje natural, la interacción humana, los sistemas cognitivos, el aprendizaje automático y los comportamientos. Algunos robots también aprenden de la experiencia replicando procesos naturales como el ensayo y error y el aprendizaje práctico, de la misma manera que aprende un niño pequeño. De esta manera, el robot humanoide gana un cierto grado de autonomía, lo que significa que los robots humanoides pueden comportarse en algunas situaciones de una manera que es impredecible para sus diseñadores humanos. Los robots humanoides están llegando a nuestros hogares y se están convirtiendo en nuestros socios. Pronto pueden ser compañeros de ancianos y niños, asistentes de enfermeras, médicos, bomberos y trabajadores. Surge la necesidad de incorporar la ética en un robot, lo que se denomina roboética. La robótica es una ética aplicada cuyo objetivo es desarrollar herramientas científicas/culturales/técnicas que puedan ser compartidas por diferentes grupos sociales y creencias. Estas herramientas tienen como objetivo promover y fomentar el desarrollo de la robótica para el avance de la sociedad humana y los individuos, y ayudar a prevenir su uso indebido contra la humanidad. En 1942, el destacado novelista Isaac Asimov formuló sus famosas tres leyes de la robótica. Más tarde, en 1983, agregó la cuarta ley, conocida como la ley cero: Ningún robot puede dañar a la humanidad o, por inacción, permitir que la humanidad sufra daños. La nueva generación de robots humanoides serán socios que coexistirán con los humanos ayudándolos tanto física como psicológicamente y contribuirán a la realización de una sociedad segura y pacífica. Serán potencialmente más éticos que los humanos.

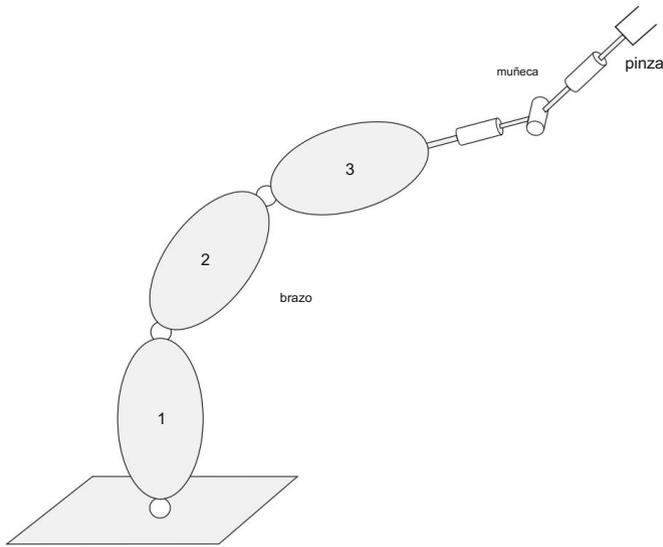


Fig. 1.2 Robot manipulador

1.1 Manipulador de robots

Hoy en día, los sistemas robóticos más útiles y eficientes son los manipuladores de robots industriales que pueden reemplazar a los trabajadores humanos en trabajos difíciles o monótonos, o donde un ser humano se enfrentaría a condiciones peligrosas. El manipulador robótico consta de un brazo robótico, una muñeca y una pinza (Fig. 1.2). El brazo del robot es una cadena en serie de tres segmentos rígidos que son relativamente largos y proporcionan posicionamiento de la pinza en el espacio de trabajo. Los segmentos vecinos de un brazo robótico están conectados a través de una articulación robótica, que es (Fig. 1.3) ya sea traslacional (prismática) o rotacional (revoluta). La junta rotacional tiene la forma de una bisagra y limita el movimiento de dos segmentos vecinos a la rotación alrededor del eje de la junta. La posición relativa viene dada por el ángulo de rotación alrededor del eje de la articulación. En robótica, los ángulos de articulación se denotan con la letra griega θ . En los diagramas simplificados, la junta de rotación está representada por un cilindro. La junta de traslación restringe el movimiento de dos segmentos vecinos a la traslación. La posición relativa entre dos segmentos se mide como una distancia.

El símbolo de la articulación de traslación es un prisma, mientras que la distancia se indica con la letra d . Las articulaciones de los robots funcionan con motores eléctricos o hidráulicos. Los sensores en las articulaciones miden el ángulo o la distancia, la velocidad y el par.

La muñeca del robot generalmente consta de tres articulaciones rotacionales. La tarea de la muñeca del robot es permitir la orientación requerida del objeto agarrado por la pinza del robot. La pinza del robot de dos o varios dedos se coloca en el extremo del robot. También se pueden conectar al punto final diferentes herramientas, para habilitar dispositivos de perforación, pintura en aerosol o soldadura. Los manipuladores de robots industriales suelen permitir la movilidad en seis grados de

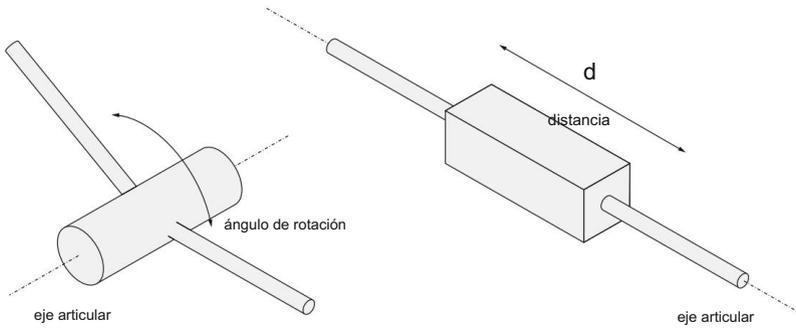


Fig. 1.3 Articulación de robot rotacional (izquierda) y traslacional (derecha)

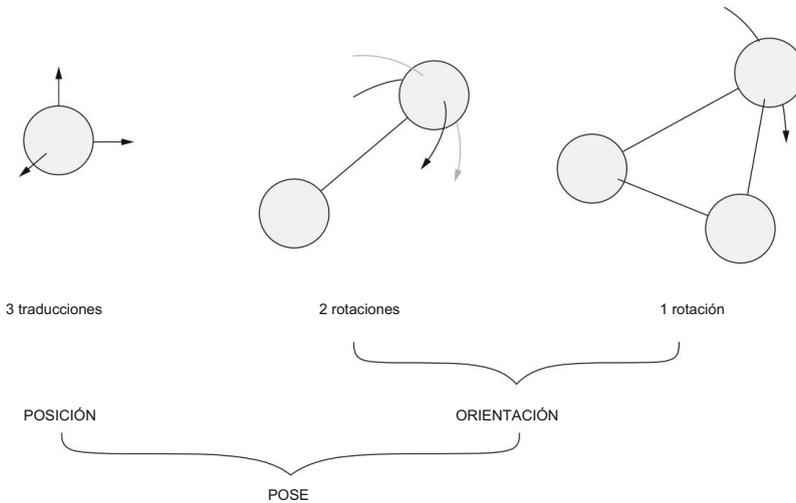


Fig. 1.4 Grados de libertad de un cuerpo rígido

libertad, lo que significa que el mecanismo robótico tiene seis articulaciones y también seis actuadores. De esta forma, el brazo del robot puede colocar un objeto en un lugar arbitrario en el espacio de trabajo del robot, mientras que la pinza puede girar el objeto sobre los tres ejes de un marco de coordenadas rectangulares.

Para aclarar el término grado de libertad, consideremos primero un cuerpo rígido que generalmente representa el objeto manipulado por el robot industrial. El cuerpo rígido más simple consta de tres partículas de masa (Fig. 1.4). Una partícula de una sola masa tiene tres grados de libertad, descritos por tres desplazamientos a lo largo de los ejes de un marco rectangular. El desplazamiento a lo largo de una línea se llama traslación. A la primera le añadimos otra partícula de masa de forma que haya una distancia constante entre ellas.

La segunda partícula está restringida para moverse sobre la superficie de una esfera que rodea a la primera partícula. Su posición en la esfera se puede describir mediante dos círculos que nos recuerdan los meridianos y las latitudes de un globo. El desplazamiento a lo largo de una línea circular es

llamado rotación. La tercera partícula de masa se agrega de tal manera que las distancias con respecto a las dos primeras partículas se mantienen constantes. De esta forma, la tercera partícula puede moverse a lo largo del círculo, una especie de ecuador, alrededor del eje determinado por las dos primeras partículas. Por lo tanto, un cuerpo rígido tiene seis grados de libertad: tres traslaciones y tres rotaciones. Los primeros tres grados de libertad describen la posición del cuerpo, mientras que los otros tres grados de libertad determinan su orientación. El término pose se usa para incluir tanto la posición como la orientación. A menudo se dice que mientras el mundo que nos rodea es tridimensional, el mundo de un especialista en robótica es hexadimensional.

Los manipuladores de robots industriales modernos son reprogramables y polivalentes. En la producción industrial moderna, ya no es económico mantener grandes existencias de materiales o productos. Esto se conoce como: Producción "Justo a tiempo". Como consecuencia, puede suceder que diferentes tipos de un determinado producto se encuentren en la misma línea de producción durante el mismo día. Este problema, que es más inconveniente para los dispositivos de automatización fijos, se puede resolver de manera eficiente mediante el uso de manipuladores robóticos industriales reprogramables. Los robots reprogramables nos permiten pasar de la producción de un tipo de producto a otro pulsando un pulsador. Además, el robot manipulador es un mecanismo polivalente. El mecanismo del robot es una burda imitación del brazo humano. De la misma manera que usamos nuestro brazo para trabajos pesados y precisos, podemos aplicar el mismo robot manipulador a diferentes tareas.

Esto es aún más importante en vista de la vida útil económica de un robot industrial, que es bastante larga (12 a 16 años). Por lo tanto, podría suceder que un robot manipulador adquirido con fines de soldadura pudiera reasignarse a una tarea de recoger y colocar. Los brazos robóticos tienen otra propiedad importante, a saber, los ejes de dos articulaciones vecinas son paralelos o perpendiculares. Como el brazo robótico tiene sólo tres grados de libertad, existe un número limitado de posibles estructuras de brazos robóticos. Entre ellos, los más utilizados son el brazo robótico antropomórfico y el denominado SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly). El brazo robótico de tipo antropomórfico (Fig. 1.5), tiene las tres articulaciones de tipo rotatorio y, como tal, se parece en gran medida al brazo humano. El segundo eje articular es perpendicular al primero, mientras que el tercer eje articular es paralelo al segundo. El espacio de trabajo del brazo robótico antropomórfico, que abarca todos los puntos a los que puede llegar el extremo del robot, tiene forma esférica. El brazo robótico SCARA apareció relativamente tarde en el desarrollo de la robótica industrial (Fig. 1.6) y se usa principalmente para procesos de ensamblaje industrial. Dos de las articulaciones son de rotación y una de traslación. Los ejes de las tres articulaciones son paralelos. El espacio de trabajo del brazo robótico SCARA es de tipo cilíndrico. En el mercado también podemos encontrar otras tres estructuras comercialmente disponibles de brazos robóticos: cilíndrica, cartesiana y en menor medida esférica.

1.2 Robótica Industrial

La industria actual ya no se puede imaginar sin manipuladores robóticos industriales, que se pueden dividir en tres grupos diferentes. En el primer grupo clasificamos a los robots industriales que tienen el papel de maestro en una célula robotizada. Una celda de robot por lo general

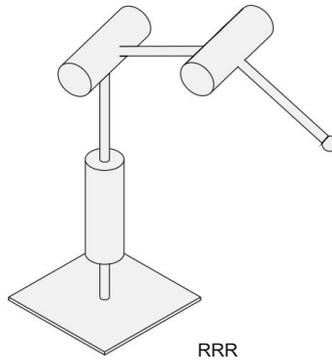


Fig. 1.5 Brazo robótico antropomórfico

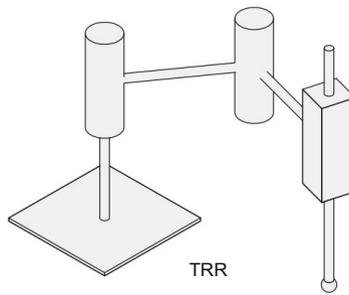


Fig. 1.6 Brazo robótico SCARA

compromete uno o más robots, estaciones de trabajo, buffers de almacenamiento, sistemas de transporte y máquinas controladas numéricamente. En el segundo grupo están los robots que son esclavos dentro de la célula robótica. En el tercer grupo incluimos los robots industriales que se utilizan en aplicaciones especiales (Fig. 1.7).

Los maestros de robot en una celda de robot se pueden encontrar en los siguientes procesos de producción: soldadura, pintura, recubrimiento y sellado, mecanizado y ensamblaje. La soldadura robótica (punto, arco, láser) representa las aplicaciones robóticas más frecuentes. Se caracteriza por la velocidad, la precisión y la exactitud. La soldadura robotizada es especialmente económica cuando se realiza en tres turnos. Hoy nos encontramos con el mayor número de robots de soldadura en la industria del automóvil. Allí, la proporción de trabajadores humanos y robots es de 6:1. Los robots industriales se utilizan a menudo en entornos agresivos o peligrosos, como la pintura en aerosol. La pintura con spray robótica supone un ahorro de material junto con una mayor calidad de las superficies pintadas. Cuando exista un entorno tóxico, la motivación social para la introducción de robots puede superar los factores económicos. En las aplicaciones de mecanizado, el robot normalmente sostiene una pieza de trabajo o un husillo motorizado y realiza taladrado, rectificado, desbarbado u otras aplicaciones similares. Los manipuladores robóticos están entrando cada vez más en el área del ensamblaje industrial, donde los componentes se ensamblan en sistemas funcionales. La industria electrónica y electromecánica repre

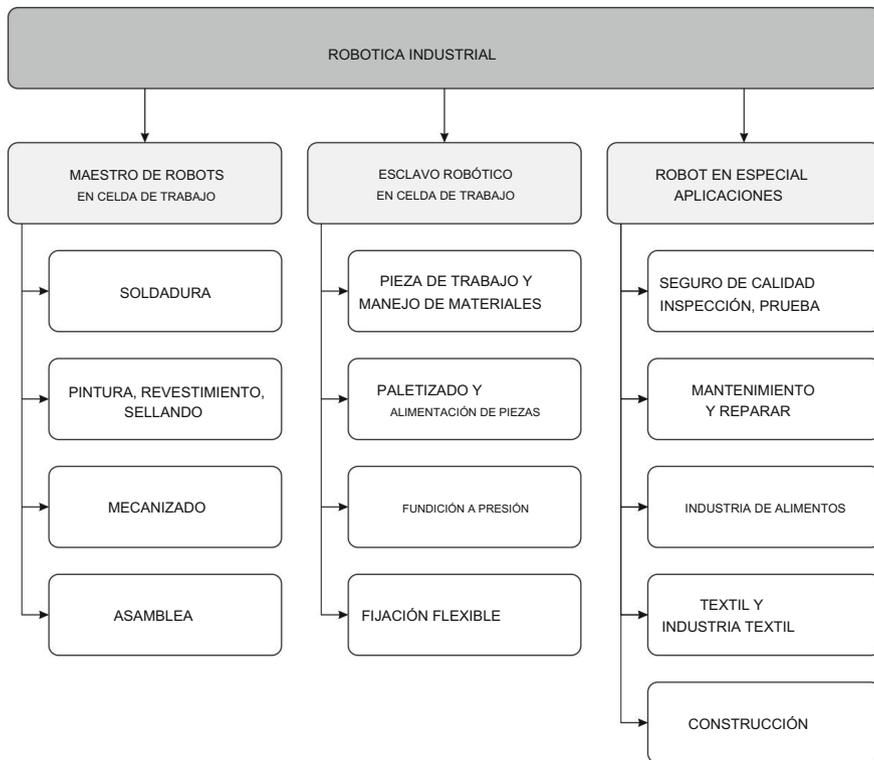


Fig. 1.7 Clasificación de los robots industriales

un área importante para la aplicación de robots de montaje. También hay operaciones de ensamblaje atractivas en la industria automotriz, donde un robot aplica adhesivo en el vidrio del parabrisas, mientras que otro robot sujeta el parabrisas y lo inserta en la abertura de la carrocería del vehículo.

El robot desempeña el papel de un esclavo en las siguientes aplicaciones industriales: manipulación de materiales y piezas de trabajo, paletización y alimentación de piezas, fundición a presión y fijación flexible. En esta situación, el papel de un maestro se le puede dar a una máquina controlada numéricamente en la celda del robot. Los robots de recogida y colocación representan el uso más común de los robots en la manipulación de materiales, donde las tareas suelen ser tediosas o repetitivas y potencialmente peligrosas (p. ej., carga en prensa). A menudo, los robots industriales se utilizan en las tareas cuando ejecutan movimientos punto a punto. Estos ejemplos se encuentran en la paletización, es decir, la disposición de piezas de trabajo o productos con el fin de empaquetarlos o entregarlos a una máquina. El paletizado por robot es especialmente apropiado y bienvenido cuando se consideran objetos pesados (por ejemplo, barriles en una cervecería). Las operaciones de fundición a presión son calientes, sucias y peligrosas, lo que proporciona un ambiente desagradable para los trabajadores humanos. Con el manejo del robot, las piezas de fundición a presión se orientan con precisión en la máquina de fundición a presión. La eficacia de una célula robótica se puede m

uso de sistemas de fijación flexibles. La flexibilidad de una celda robótica se logra a través de posicionadores programables servoaccionados, lo que permite que el proceso de fabricación se realice con mayor rapidez y destreza.

Las aplicaciones especiales de los robots industriales son las siguientes: control de calidad, inspección y pruebas, mantenimiento y reparación, robots en la industria alimentaria, textil y de la confección, y en la construcción. La garantía de calidad, la inspección y las pruebas se aplican a menudo en la industria electrónica, donde los parámetros eléctricos (por ejemplo, voltaje, corriente, resistencia) se prueban durante el montaje de circuitos electrónicos. En esta situación el robot realiza las medidas necesarias sobre el objeto (dimensional, eléctrico), mientras lo agarra y lo coloca en una nueva posición. En el mantenimiento y reparación de robots, los robots teleoperados y autónomos se utilizan para una variedad de aplicaciones en la industria nuclear, carreteras, ferrocarriles, mantenimiento de líneas eléctricas y servicio de aeronaves. Los robots también están entrando en la industria alimentaria, donde además de las aplicaciones de manipulación y envasado en el procesamiento de alimentos, se utilizan para tareas como la preparación de alimentos o incluso la decoración de chocolates. La industria textil y de la confección presenta problemas únicos debido a la naturaleza floja de las piezas de trabajo, lo que hace que el manejo de textiles o materiales similares sea extremadamente complicado. Se han desarrollado muchos tipos diferentes de robots de construcción en todo el mundo, sin embargo, se han comercializado muy pocos.

Los desafíos clave de la robótica actual son la interacción humano-robot y la colaboración humano-robot. El desarrollo de la denominada robótica blanda permite que humanos y robots interactúen y colaboren en entornos industriales, de servicio y cotidianos. Al desarrollar robots colaborativos, o en breve co-bots, se debe garantizar la seguridad de la interacción humano-robot. Por lo tanto, era necesario el análisis de las lesiones humanas causadas por impactos de herramientas contundentes o afiladas como primer paso en la investigación de robots colaborativos. Sobre la base de numerosos estudios de colisiones entre humanos y robots, se determinaron las velocidades seguras del robot para determinadas propiedades de inercia del robot. La interacción segura entre humanos y robots está garantizada aún más por los novedosos esquemas de control que miden el par en cada articulación del robot, detectan los más mínimos contactos entre el robot y el operador humano y detienen instantáneamente el robot. El requisito previo para el control eficiente del par es un modelo extremadamente detallado de la dinámica del robot. Para hacer que el manipulador del robot sea compatible, cuando está en contacto con un operador humano, también se utiliza un enfoque inspirado en la biología. Almacenar la energía en los elementos de resorte en las articulaciones del brazo del robot hace que el control de movimiento sea eficiente y natural. Los cobots complejos, a menudo aplicados como sistemas de robots de múltiples brazos, no se pueden programar de la misma manera que los manipuladores de robots industriales comunes. Deben introducirse enfoques de robótica cognitiva basados en técnicas de inteligencia artificial, como el aprendizaje por imitación, el aprendizaje a partir de demostraciones, el aprendizaje por refuerzo o el aprendizaje por recompensas. De esta forma, los co-bots pueden realizar tareas en entornos desconocidos y no estructurados. También se debe prestar especial atención a las manos de los robots. Al colaborar con un operador humano, la mano del robot debe ser humanoide para poder operar herramientas y equipos diseñados para la mano humana. Además, la mano del robot debe medir las fuerzas ejercidas para proporcionar un agarre suave. Los robots industriales de hoy, por razones de seguridad, siguen trabajando detrás de las vallas. La robótica blanda industrial sin vallas tiene el potencial de abrir nuevas aplicaciones imprevistas, lo que lleva a una automatización más flexible y rentable.

Capítulo 2

Matrices de Transformación Homogénea



2.1 Transformación traslacional

Como se indicó anteriormente, los robots tienen articulaciones de traslación o de rotación. Para describir el grado de desplazamiento en una articulación, necesitamos una descripción matemática unificada de los desplazamientos de traslación y rotación. El desplazamiento traslacional d , dado por el vector

$$d = ai + bj + ck, \quad (2.1)$$

puede ser descrita también por la siguiente matriz de transformación homogénea H

$$H = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Cuando se usan matrices de transformación homogéneas, un vector arbitrario tiene la siguiente forma 4×1

$$q = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = xyz \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}^T. \quad (2.3)$$

Un desplazamiento de traslación del vector q para una distancia d se obtiene multiplicando el vector q con la matriz H

$$v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + a \\ y + b \\ z + c \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

La traslación, que se presenta por multiplicación con una matriz homogénea, es equivalente a la suma de los vectores q y d

$$v = q + d = (xi + yj + zk) + (ai + bj + ck) = (x + a)i + (y + b)j + (z + c)k. \quad (2.5)$$

En un ejemplo simple, el vector $1i + 2j + 3k$ se desplaza traslacionalmente la distancia $2i - 5j + 4k$

$$v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ -5 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -5 \\ 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ -3 \\ 7 \end{pmatrix}$$

El mismo resultado se obtiene sumando los dos vectores.

2.2 Transformación rotacional

Los desplazamientos de rotación se describirán en un marco de coordenadas rectangulares de mano derecha, donde las rotaciones alrededor de los tres ejes, como se muestra en la Fig. 2.1, se consideran positivas. Las rotaciones positivas alrededor del eje seleccionado son en sentido antihorario cuando se mira desde el extremo positivo del eje hacia el origen O del marco x - y - z . La rotación positiva también se puede describir mediante la llamada regla de la mano derecha, donde el pulgar se dirige a lo largo del eje hacia su extremo positivo, mientras que los dedos muestran el

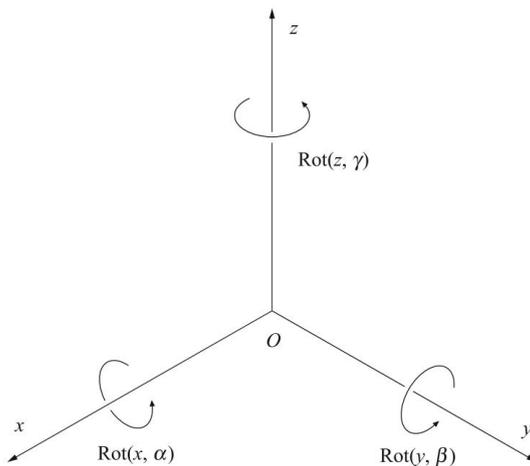


Fig. 2.1 Marco rectangular derecho con rotaciones positivas

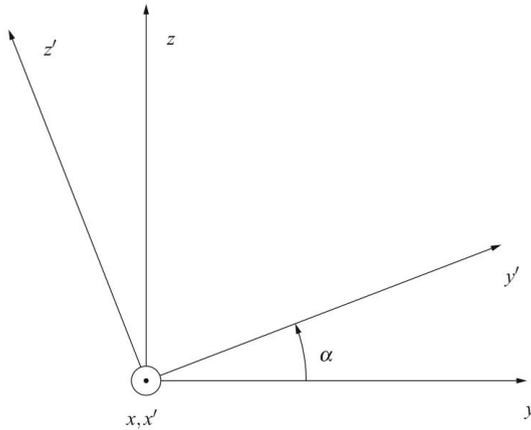


Fig. 2.2 Rotación alrededor del eje x

dirección positiva del desplazamiento de rotación. La dirección de carrera de los atletas en un estadio también es un ejemplo de rotación positiva.

Primero echemos un vistazo más de cerca a la rotación alrededor del eje x. La coordenada

El marco $x'-y'-z'$ que se muestra en la figura 2.2 se obtuvo girando el marco de referencia $x-y-z$ en la dirección positiva alrededor del eje x para el ángulo α . Los ejes x' y x colineales.

El desplazamiento rotacional también se describe mediante una matriz de transformación homogénea. Las primeras tres filas de la matriz de transformación corresponden a los ejes x, y y z del marco de referencia, mientras que las primeras tres columnas se refieren a x', y', z' los ejes x del marco rotado. Los nueve elementos de la parte superior izquierda de la matriz H representan la matriz de rotación de 3×3 . Los elementos de la matriz de rotación son cosenos de los ángulos entre los ejes dados por la columna y fila correspondientes

$$\begin{aligned}
 \text{Rot}(x, \alpha) &= \begin{array}{ccc|c}
 & x & y & z \\
 \hline
 x & \cos 0^\circ & \cos 90^\circ & \cos(90^\circ + \alpha) \\
 y & \cos 90^\circ & \cos(90^\circ - \alpha) & \cos \alpha \\
 z & 0 & 0 & 1
 \end{array} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

El ángulo entre la x' y el eje x es 0° , por lo tanto tenemos $\cos 0^\circ$ en el intersección x de la x' columna y la fila x. El ángulo entre la y' y los ejes y

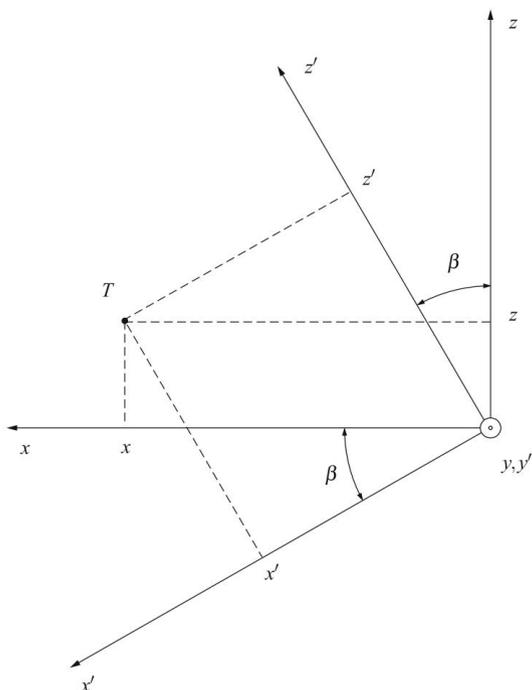


Fig. 2.3 Rotación alrededor del eje y

es 90° , ponemos $\cos 90^\circ$ en la intersección correspondiente. El ángulo entre la y y el eje y' es α , el elemento de matriz correspondiente es $\cos \alpha$.

Para familiarizarnos más con las matrices de rotación, derivaremos la matriz que describe una rotación alrededor del eje y utilizando la figura 2.3. Los ejes colineales son y y y'

$$y = y' \quad (2.7)$$

Al considerar la similitud de los triángulos en la Fig. 2.3, no es difícil derivar las siguientes dos ecuaciones

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \beta + z \sin \beta \\ z' &= -x \sin \beta + z \cos \beta \end{aligned} \quad (2.8)$$

Las tres ecuaciones. (2.7) y (2.8) se pueden reescribir en forma matricial

$$\text{Rot}(y, \beta) = \begin{matrix} & \begin{matrix} x' & y' & z' \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} & \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.9)$$

La rotación alrededor del eje z se describe mediante la siguiente trans homogénea matriz de formación

$$\text{Rot}(z, \gamma) = \begin{matrix} & \begin{matrix} x' & y' & z' \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} & \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.10)$$

En un ejemplo numérico simple, deseamos determinar el vector w , que se obtiene girando el vector $u = 14i + 6j + 0k$ durante 90° en sentido antihorario (es decir, positivo) alrededor del eje z . Como $\cos 90^\circ = 0$ y $\sin 90^\circ = 1$, no es difícil determinar la matriz que describe $\text{Rot}(z, 90^\circ)$ y multiplicarla por el vector u

$$w = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 14 \\ 6 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -6 \\ 14 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La presentación gráfica de la rotación del vector u alrededor del eje z se muestra en la figura 2.4.

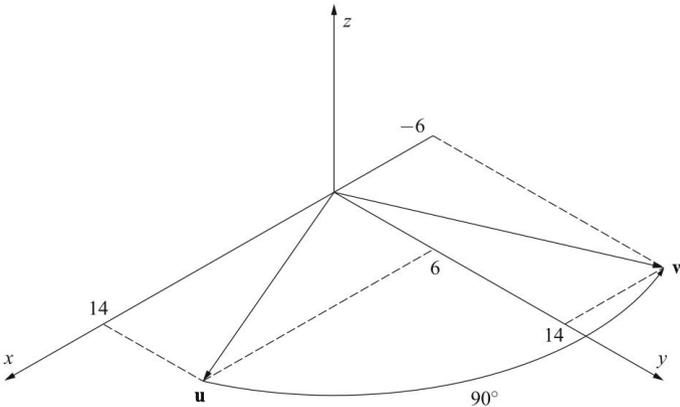


Fig. 2.4 Ejemplo de transformación rotacional

2.3 Pose y Desplazamiento

En la sección anterior hemos aprendido cómo se traslada o rota un punto alrededor de los ejes del marco cartesiano. A continuación nos interesaremos por los desplazamientos de objetos. Siempre podemos adjuntar un marco de coordenadas a un objeto rígido bajo consideración. En esta sección nos ocuparemos de la pose y el desplazamiento de marcos rectangulares. Aquí vemos que una matriz de transformación homogénea describe la pose de un cuadro con respecto a un cuadro de referencia, o representa el desplazamiento de un cuadro a una nueva pose. En el primer caso, la matriz de 3×3 de la parte superior izquierda representa la orientación del objeto, mientras que la columna de 3×1 de la derecha describe su posición (p. ej., la posición de su centro de masa). La última fila de la matriz de transformación homogénea estará siempre representada por [0001]. En el caso del desplazamiento del objeto, la matriz superior izquierda corresponde a la rotación y la columna de la derecha corresponde a la traslación del objeto. Examinaremos ambos casos a través de ejemplos sencillos. Primero aclaremos el significado de la matriz de transformación homogénea que describe la pose de un marco arbitrario con respecto al marco de referencia. Consideremos el siguiente producto de matrices homogéneas que da una nueva matriz de transformación homogénea H

$$\begin{aligned}
 H &= \text{Trans}(8, -6, 14) \text{Rot}(y, 90^\circ) \text{Rot}(z, 90^\circ) \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 1 & 0 & -6 \\ 0 & 0 & 1 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 8 \\ 1 & 0 & 0 & -6 \\ 0 & 1 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

Al definir la matriz homogénea que representa la rotación, aprendimos que las primeras tres columnas describen la rotación del marco $x'-y'-z'$ con respecto al marco de referencia $x-y-z$

$$\begin{aligned}
 &\begin{matrix} x' & y' & z' \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

La cuarta columna representa la posición del origen del marco $x'-y'-z'$ con respecto al marco de referencia $x-y-z$. Con este conocimiento podemos representar gráficamente el marco $x'-y'-z'$ descrito por la matriz de transformación homogénea (2.11), relativo al marco de referencia $x-y-z$ (Fig. 2.5). El eje x apunta en el

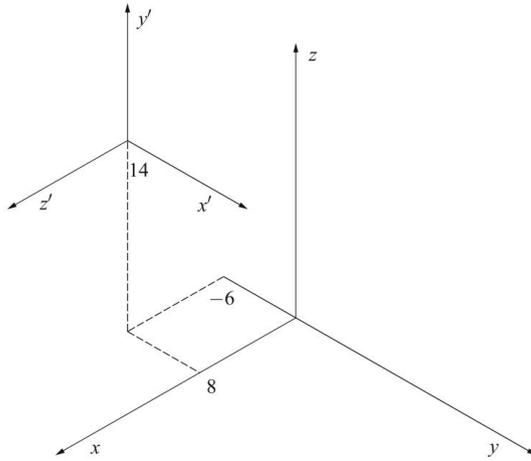


Fig. 2.5 La pose de un marco arbitrario $x'-y'-z'$ con respecto al marco de referencia $x-y-z$

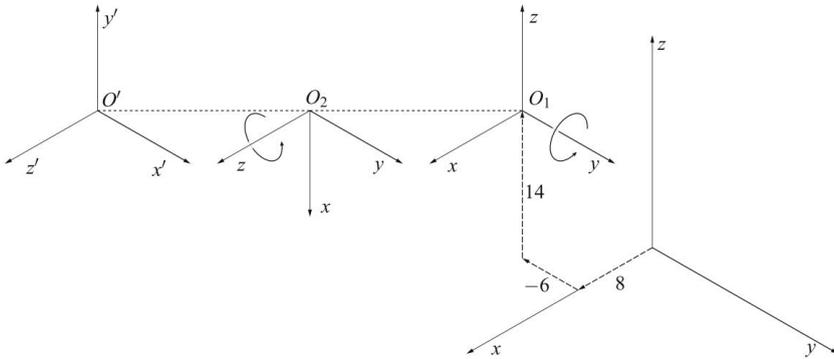


Fig. 2.6 Desplazamiento del marco de referencia a una nueva pose (de derecha a izquierda). Los orígenes O_1 , O_2 y O' están en el mismo punto

dirección del eje y' y del marco de referencia, la y y la z el eje z' está en la dirección del eje z ,
Para el eje x' está en la dirección x .

convencernos de la corrección del marco dibujado en la Fig. 2.6, comprobaremos los desplazamientos incluidos en la Ec. (2.11). El marco de referencia primero se traslada al punto (8, -6, 14), luego se gira 90° alrededor del nuevo eje y y finalmente se gira 90° alrededor del eje $newestz$ (Fig. 2.6). Los tres desplazamientos del marco de referencia dan como resultado la misma pose final que se muestra en la Fig. 2.5.

A continuación de este capítulo, deseamos dilucidar el segundo significado de la matriz de transformación homogénea, es decir, un desplazamiento de un objeto o marco de coordenadas a una nueva pose (Fig. 2.7). Primero, deseamos rotar el marco de coordenadas $x-y-z$ 90° en dirección contraria a las manecillas del reloj alrededor del eje z . Esto se puede lograr mediante la siguiente post-multiplicación de la matriz H que describe la pose inicial del

marco de coordenadas $x-y-z$

$$H1 = H \cdot \text{Rot}(z, 90^\circ). \quad (2.13)$$

El desplazamiento resultó en una nueva pose del objeto y un nuevo marco $x'-y'-z'$ que se muestra en la figura 2.7. Desplazaremos este nuevo marco para -1 a lo largo de x' eje, 3 unidades a lo largo y' eje y -3 a lo largo de z' eje

$$H2 = H1 \cdot \text{Trans}(-1, 3, -3). \quad (2.14)$$

Después de la traducción, se obtiene una nueva pose del objeto junto con un nuevo marco $x''-y''-z''$. Este marco finalmente se rotará 90° alrededor del eje y'' en la dirección positiva

$$H3 = H2 \cdot \text{Rot}(y'', 90^\circ). \quad (2.15)$$

Las ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.15) pueden insertarse sucesivamente una dentro de otra

$$H3 = H \cdot \text{Rot}(z, 90^\circ) \cdot \text{Trans}(-1, 3, -3) \cdot \text{Rot}(y'', 90^\circ) = H \cdot D. \quad (2.16)$$

En la ecuación. (2.16), la matriz H representa la pose inicial del encuadre, $H3$ es la pose final, mientras que D representa el desplazamiento

$$\begin{aligned} D &= \text{Rot}(z, 90^\circ) \cdot \text{Trans}(-1, 3, -3) \cdot \text{Rot}(y'', 90^\circ) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -100 & 100 & -1 & 0 & 010 \\ 1 & 0 & 00 & 010 & 3 & 0 & 100 \\ 0 & 0 & 10 & 001 & -3 & -1000 \\ 0 & 0 & 01 & 000 & 1 & 0 & 001 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -3 \\ 0 & 01 & -1 \\ -100 & -3 & 0 \\ 001 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Finalmente, realizaremos la post-multiplicación describiendo la nueva pose relativa del objeto.

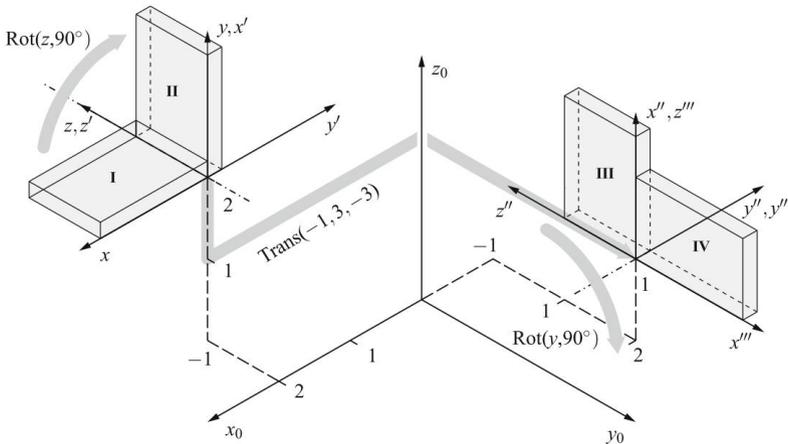


Fig. 2.7 Desplazamiento del objeto a una nueva pose

$$\begin{aligned}
 H_3 = H \cdot D = & \begin{array}{cc} 10 & 0 & 2 & 0 & -1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 1 & -100 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \\
 & \begin{array}{c} x''' \quad y''' \quad z''' \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ = & 1002 & x_0 \\ & 0011 & y_0 \\ & 0001 & z_0 \end{array} \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

Como en el ejemplo anterior verificaremos gráficamente la corrección de la matriz (2.18). Los tres desplazamientos del marco x - y - z : rotación de 90° en dirección contraria a las manecillas del reloj alrededor del eje z , traslación de -1 a lo largo del eje x , 3 unidades a lo largo 'eje y y -3 a lo largo de z' eje y rotación de 90° alrededor de y'' eje en positivo " de la dirección y se muestran en la figura 2.7. El resultado es la pose final del " , " , z'' . objeto " el eje apunta en la dirección positiva del eje y_0 , y''' y apunta en los puntos dirección del eje x_0 y z''' negativos en la dirección positiva del eje z_0 del marco de referencia. Las direcciones de los ejes del cuadro final corresponden a las tres primeras columnas de la matriz H_3 . También hay concordancia entre la posición del origen del cuadro final en la figura 2.7 y la cuarta columna de la matriz H_3 .

2.4 Modelo de robot geométrico

Nuestro objetivo final es el modelo geométrico de un robot manipulador. Un modelo de robot geométrico viene dado por la descripción de la pose del último segmento del robot (efector final) expresada en el marco de referencia (base). El conocimiento de cómo describir el

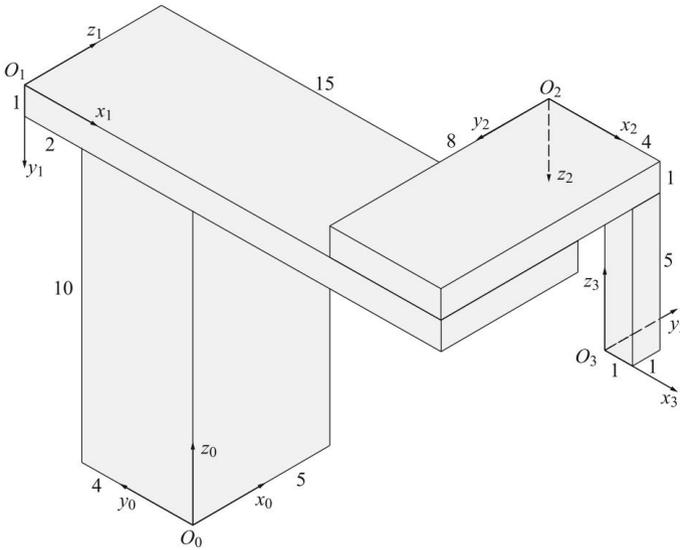


Fig. 2.8 Montaje mecánico

La pose de un objeto utilizando matrices de transformación homogéneas se aplicará primero al proceso de ensamblaje. Para ello, se considerará un conjunto mecánico formado por cuatro bloques, como el que se presenta en la Fig. 2.8. Se coloca un plato de dimensiones $(5 \times 15 \times 1)$ sobre un bloque $(5 \times 4 \times 10)$. Otra placa $(8 \times 4 \times 1)$ se coloca perpendicularmente a la primera, sosteniendo otro pequeño bloque $(1 \times 1 \times 5)$.

Se adjunta un marco a cada uno de los cuatro bloques, como se muestra en la figura 2.8. Nuestra tarea será calcular la pose del marco $x_3-y_3-z_3$ con respecto al marco de referencia $x_0-y_0-z_0$. En el último capítulo aprendimos que la pose de un marco desplazado se puede expresar con respecto al marco de referencia utilizando la matriz de transformación homogénea H . La pose del cuadro $x_1-y_1-z_1$ con respecto al cuadro $x_0-y_0-z_0$ se denotará por $0H1$. De la misma manera $1H2$ representa la pose del cuadro $x_2-y_2-z_2$ con respecto a $x_1-y_1-z_1$ y $2H3$ la pose de $x_3-y_3-z_3$ con respecto al cuadro $x_2-y_2-z_2$. Aprendimos también que los desplazamientos sucesivos se expresan mediante post-multiplicaciones (multiplicaciones sucesivas de izquierda a derecha) de matrices de transformación homogéneas. El proceso de ensamblaje se puede describir mediante la posmultiplicación de las matrices correspondientes. La pose del cuarto bloque se puede escribir con respecto al primero mediante la siguiente matriz

$$0H3 = 0H1 \ 1H2 \ 2H3. \quad (2.19)$$

Los bloques se colocaron perpendicularmente uno a otro. De esta forma no es necesario calcular los senos y cosenos de los ángulos de rotación. Las matrices se pueden determinar directamente a partir de la figura 2.8. El eje x del marco $x_1-y_1-z_1$ apunta en la dirección negativa del eje y en el marco $x_0-y_0-z_0$. El eje y del marco $x_1-y_1-z_1$ apunta en

dirección negativa del eje z en el marco $x_0-y_0-z_0$. El eje z del marco $x_1-y_1-z_1$ tiene la misma dirección que el eje x del marco $x_0-y_0-z_0$. Las propiedades geométricas descritas de la estructura del conjunto se escriben en las tres primeras columnas de la matriz homogénea. La posición del origen del marco $x_1-y_1-z_1$ con respecto al marco $x_0-y_0-z_0$ se escribe en la cuarta columna

$${}^0H_1 = \begin{matrix} & & & O_1 \\ & & & - \quad - \\ & & & xyz \\ & & & 0 \ 0 \ 10 \quad x \\ & & & -1 \ 0 \ 06 \quad y \quad O_0 \\ & & & 0 \ -1 \ 0 \ 11 \quad z \\ & & & 0 \ 0 \ 01 \end{matrix} \quad (2.20)$$

De la misma manera se determinan las otras dos matrices

$${}^1H_2 = \begin{matrix} 1 \ 0 \ 0 \ 11 \\ 0 \ 0 \ 1 \ -1 \\ 0 \ -10 \ 8 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{matrix} \quad (2.21)$$

$${}^2H_3 = \begin{matrix} 10 \ 03 \\ 0 \ -10 \ 1 \\ 0 \ 0 \ -1 \ 6 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{matrix} \quad (2.22)$$

La posición y orientación del cuarto bloque con respecto al primero viene dada por la matriz 0H_3 que se obtiene de la multiplicación sucesiva de las matrices (2.20), (2.21) y (2.22)

$${}^0H_3 = \begin{matrix} 0 \ 10 \ 7 \\ -100 \ -8 \\ 0 \ 0 \ 1 \ 6 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{matrix} \quad (2.23)$$

La cuarta columna de la matriz 0H_3 [7, -8, 6, 1]^T representa la posición del origen del marco $x_3-y_3-z_3$ con respecto al marco de referencia $x_0-y_0-z_0$. La precisión de la cuarta columna se puede verificar en la Fig. 2.8. La parte rotacional de la matriz 0H_3 representa la orientación del marco $x_3-y_3-z_3$ con respecto al marco de referencia $x_0-y_0-z_0$.

Ahora imaginemos que la primera placa horizontal gira con respecto al primer bloque vertical alrededor del eje 1 para el ángulo θ_1 . La segunda placa también gira alrededor del eje vertical 2 para el ángulo θ_2 . El último bloque se alarga una distancia d_3 a lo largo del tercero

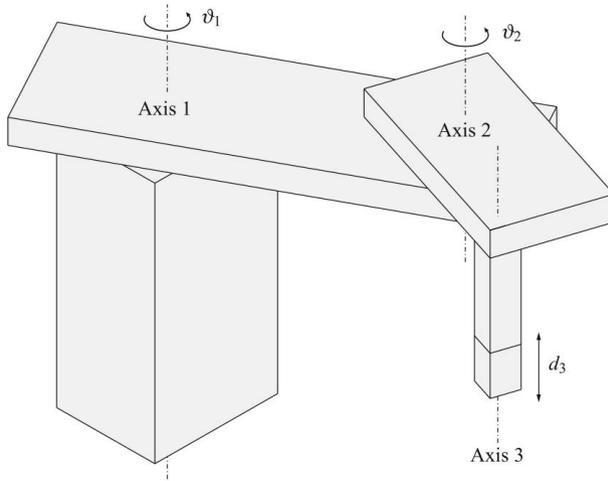


Fig. 2.9 Desplazamientos del conjunto mecánico

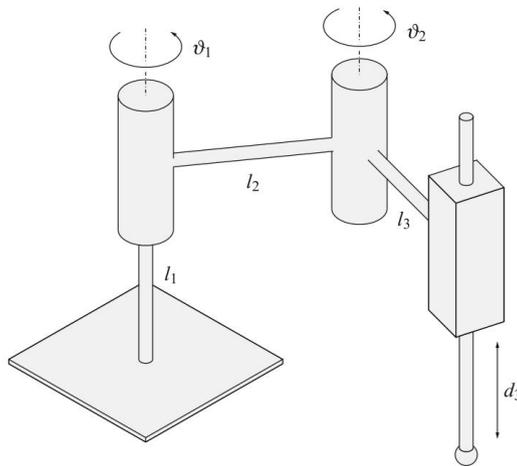


Fig. 2.10 Robot manipulador SCARA en una pose arbitraria

eje. De esta manera obtuvimos un robot manipulador, del tipo SCARA como se mencionó en el capítulo introductorio.

Nuestro objetivo es desarrollar un modelo geométrico del robot SCARA. Los bloques y las placas de la figura 2.9 serán reemplazados por símbolos de juntas de rotación y traslación que conocemos de la introducción (figura 2.10).

El primer segmento vertical con la longitud l_1 parte de la base (donde el robot está sujeto al suelo) y termina en la primera junta rotacional. El segundo segmento con longitud l_2 es horizontal y gira alrededor del primer segmento. La rotación en la primera articulación se denota por el ángulo ϑ_1 . El tercer segmento con la longitud l_3 también es

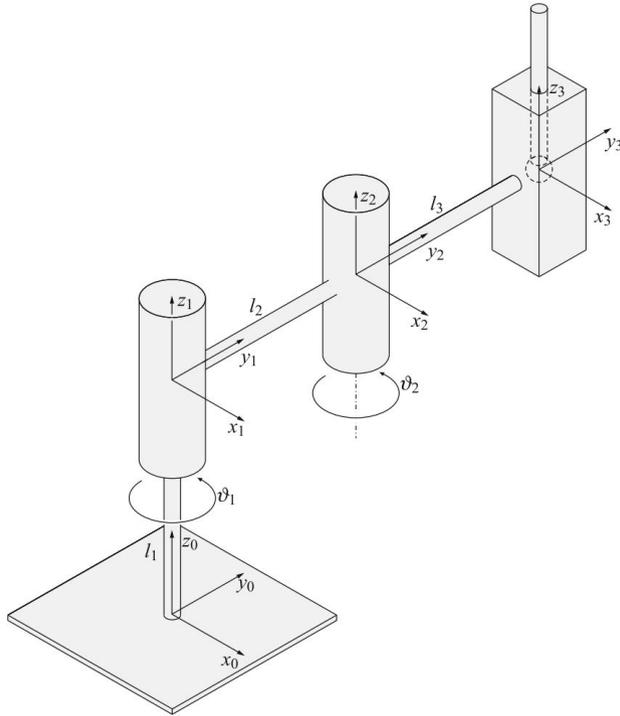


Fig. 2.11 El robot manipulador SCARA en la pose inicial

horizontal y gira alrededor del eje vertical al final del segundo segmento. El ángulo se denota como θ_2 . Hay una junta de traslación al final del tercer segmento. Permite que el efector final del robot se acerque al plano de trabajo donde tiene lugar la tarea del robot. La junta de traslación se desplaza desde la longitud inicial cero hasta la longitud descrita por la variable d_3 .

El mecanismo del robot se lleva primero a la posición inicial, que también se denomina "posición inicial". En la pose inicial, dos segmentos vecinos deben ser paralelos o perpendiculares. Las articulaciones de traslación están en su posición inicial $d_i = 0$. La pose inicial del manipulador SCARA se muestra en la Fig. 2.11.

Primero, los marcos de coordenadas deben dibujarse en el robot SCARA presentado en la Fig. 2.11. El primer marco de coordenadas (referencia) x_0 - y_0 - z_0 se coloca en la base del robot. En el último capítulo aprenderemos que los estándares de los robots requieren que el eje z_0 apunte perpendicularmente desde la base. En este caso se alinea con el primer segmento. Los otros dos ejes se seleccionan de tal manera que los segmentos del robot sean paralelos a uno de los ejes del marco de coordenadas de referencia, cuando el robot está en su posición inicial. En este caso alineamos el eje y_0 con los segmentos. El marco de coordenadas debe ser diestro. El resto de los marcos se colocan en las articulaciones del robot. Los orígenes de los marcos se dibujan en el centro de cada unión. Uno

de los ejes del marco debe estar alineado con el eje de la junta. La forma más sencilla de calcular el modelo geométrico de un robot es hacer que todos los marcos de las articulaciones del robot sean paralelos al marco de referencia (Fig. 2.11).

El modelo geométrico de un robot describe la posición del marco unido al efector final con respecto al marco de referencia en la base del robot. Asimismo, como en el caso del montaje mecánico, obtendremos el modelo geométrico por multiplicación sucesiva (post-multiplicación) de matrices de transformación homogéneas. La principal diferencia entre el ensamblaje mecánico y el robot manipulador son los desplazamientos de las articulaciones del robot. Para este propósito, cada matriz $i-1H_i$ que describa la posición de un segmento será seguida por una matriz D_i que representará el desplazamiento de la articulación de traslación o de rotación. Nuestro robot SCARA tiene tres articulaciones. La pose del marco final $x_3-y_3-z_3$ con respecto al marco base $x_0-y_0-z_0$ se expresa mediante la siguiente posmultiplicación de tres pares de matrices de transformación homogéneas

$${}^0H_3 = ({}^0H_1D_1) \cdot ({}^1H_2D_2) \cdot ({}^2H_3D_3). \quad (2.24)$$

En la ecuación. (2.24), las matrices 0H_1 , 1H_2 y 2H_3 describen la pose de cada marco de unión con respecto al marco anterior de la misma manera que en el caso del ensamblaje de los bloques. De la figura 2.11 es evidente que la matriz D_1 representa una rotación alrededor del eje positivo z_1 . El siguiente producto de dos matrices describe la pose y el desplazamiento en la primera articulación

$${}^0H_1D_1 = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} = \begin{matrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} = \begin{matrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}.$$

En las matrices anteriores se usó la siguiente notación más corta sin $\sin \theta = s_\theta$ y $\cos \theta = c_\theta$.

En la segunda articulación hay una rotación alrededor del eje z_2

$${}^1H_2D_2 = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} = \begin{matrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} = \begin{matrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}.$$

En la última articulación hay traslación a lo largo del eje z_3

$${}^2H_3D_3 = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & l_3 & 0 \\ 0 & 1 & -d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}.$$

El modelo geométrico del robot manipulador SCARA se obtiene por post multiplicación de las tres matrices derivadas anteriormente

$${}^0H_3 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & -l_3s_{12} - l_2s_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_3c_{12} + l_2c_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Al multiplicar las tres matrices se introdujo la siguiente abreviatura $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2) = c_1c_2 - s_1s_2$ y $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2) = s_1c_2 + c_1s_2$.

Capítulo 3

Descripción geométrica del robot

Mecanismo



La descripción geométrica del mecanismo del robot se basa en el uso de matrices de transformación homogéneas traslacionales y rotacionales. Se adjunta un marco de coordenadas a la base del robot y a cada segmento del mecanismo, como se muestra en la Fig. 3.1.

Luego, se determinan las matrices de transformación correspondientes entre los cuadros consecutivos. Un vector expresado en uno de los marcos puede transformarse en otro marco mediante la multiplicación sucesiva de matrices de transformación intermedias.

El vector a en la figura 3.1 se expresa en relación con el marco de coordenadas $x_3-y_3-z_3$, mientras que el vector b se da en el marco $x_0-y_0-z_0$ que pertenece a la base del robot. Una relación matemática entre los dos vectores se obtiene mediante la siguiente transformación homogénea

$${}^0H_3 = \begin{bmatrix} 0H_1 & 1H_2 & 2H_3 \\ & & \\ & & \\ & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

3.1 Parámetros vectoriales de un par cinemático

Los parámetros vectoriales se utilizarán para la descripción geométrica de un mecanismo de robot. Para simplificar, limitaremos nuestra consideración a los mecanismos con ejes de articulación paralelos o perpendiculares consecutivos. Estos mecanismos son, con diferencia, los más frecuentes en robótica industrial.

En la figura 3.2, se muestra un par cinemático que consta de dos segmentos consecutivos de un mecanismo de robot, el segmento $i-1$ y el segmento i . Los dos segmentos están conectados por la articulación i , que incluye tanto la traslación como la rotación. La pose relativa de la articulación está determinada por el vector de segmento b_{i-1} y el vector de articulación unitaria e_i , como se muestra en la Fig. 3.2. El segmento i se puede trasladar con respecto al segmento $i-1$ a lo largo del vector e_i para la distancia d_i y se puede rotar alrededor de e_i para el ángulo θ_i . La coordenada

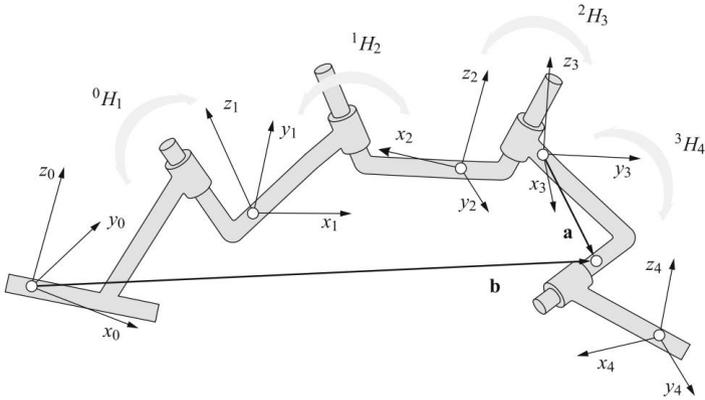


Fig. 3.1 Mecanismo de robot con marcos de coordenadas adjuntas a sus segmentos

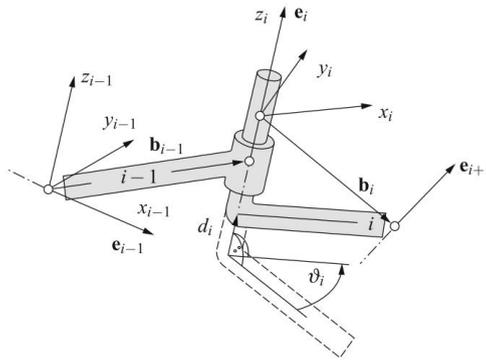


Fig. 3.2 Parámetros vectoriales de un par cinemático

el marco $x_i-y_i-z_i$ está unido al segmento i , mientras que el marco $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ pertenece al segmento $i-1$.

El marco de coordenadas $x_i-y_i-z_i$ se coloca en el eje de la articulación i de tal manera que es paralelo al marco anterior $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ cuando el par cinemático está en su posición inicial (ambas variables conjuntas son cero $\theta_i = 0$ y $d_i = 0$).

Las relaciones geométricas y el desplazamiento relativo de dos seg vecinos

Los movimientos de un mecanismo de robot están determinados por los siguientes parámetros:

e_i —vector unitario que describe el eje de rotación o la dirección de traslación en la articulación i y se expresa como uno de los ejes del marco $x_i-y_i-z_i$.

Sus componentes son los siguientes

$$e_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} ;$$

\mathbf{b}_{i-1} —vector de segmento que describe el segmento $i - 1$ expresado en el marco $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$. Sus componentes son los siguientes

$$\mathbf{b}_{i-1} = \begin{matrix} b_{i-1,x} \\ b_{i-1,y} \\ b_{i-1,z} \end{matrix} ;$$

θ_i —variable rotacional que representa el ángulo medido alrededor del eje e_i en el plano que es perpendicular a e_i (el ángulo es cero cuando el par cinemático está en la posición inicial); d_i —variable traslacional que

representa la distancia medida a lo largo de la dirección de e_i (la distancia es igual a cero cuando el par cinemático está en la posición inicial).

Si la articulación es solo rotacional (Fig. 3.3 anterior), la variable de la articulación está representada por el ángulo θ_i , mientras que $d_i = 0$. Cuando el mecanismo del robot está en su posición inicial, el ángulo de la articulación es igual a cero $\theta_i = 0$ y los marcos de coordenadas $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ y $x_i-y_i-z_i$ son paralelos. Si la articulación es solo de traslación (Fig. 3.3 a continuación), la variable de la articulación es d_i ,

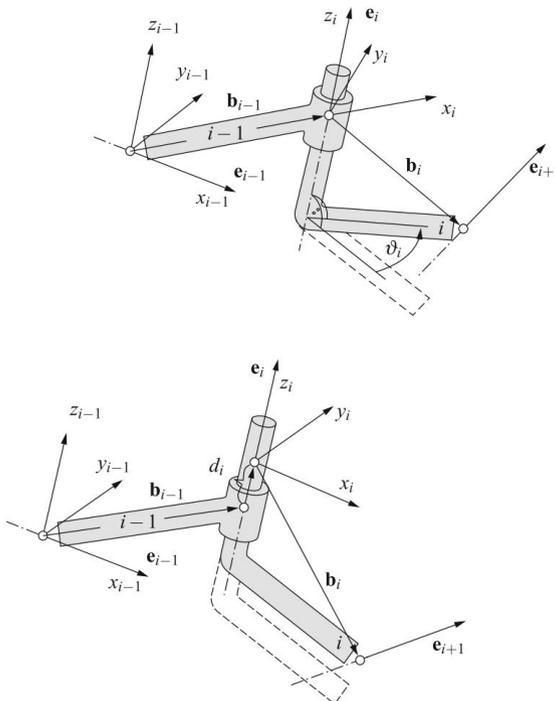


Fig. 3.3 Parámetros vectoriales de un par cinemático

mientras que $\theta_i = 0$. Cuando la articulación está en su posición inicial, entonces $d_i = 0$. En este caso, los marcos de coordenadas $x_i-y_i-z_i$ y $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ son paralelos independientemente del valor de la variable traslacional d_i .

Al cambiar el valor de la variable conjunta rotacional θ_i , el marco de coordenadas $x_i-y_i-z_i$ se gira junto con el segmento i con respecto al segmento anterior $i-1$ y el marco correspondiente $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$. Al cambiar la variable traslacional d_i , el desplazamiento es traslacional, donde solo cambia la distancia entre los dos marcos vecinos.

La transformación entre los marcos de coordenadas $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ y $x_i-y_i-z_i$ está determinada por la matriz de transformación homogénea que toma una de las tres formas posibles con respecto a la dirección del vector conjunto e_i . Cuando el vector unitario e_i es paralelo al eje x_i , hay

$${}_{i-1}H_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_i + b_{i-1,x} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & b_{i-1,y} & b_{i-1,z} & 1 \\ 0 & \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

cuando e_i es paralela al eje y_i , tenemos la siguiente matriz de transformación

$${}_{i-1}H_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i & b_{i-1,x} \\ 10 & d_i + b_{i-1,y} & -\sin \theta_i & 0 \\ \cos \theta_i & b_{i-1,z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Cuando e_i es paralela al eje z_i , la matriz tiene la siguiente forma

$${}_{i-1}H_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & b_{i-1,x} \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & b_{i-1,y} \\ 0 & 0 & 1 & d_i + b_{i-1,z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.4)$$

En la pose inicial, los marcos de coordenadas $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ y $x_i-y_i-z_i$ son paralelos ($\theta_i = 0$ y $d_i = 0$) y están desplazados solo por el vector b_{i-1}

$${}_{i-1}H_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & b_{i-1,x} \\ 0 & 1 & 0 & b_{i-1,y} \\ 0 & 0 & 1 & b_{i-1,z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

3.2 Parámetros vectoriales del mecanismo

Los parámetros vectoriales de un mecanismo de robot se determinan en los siguientes cuatro pasos:

paso 1: el mecanismo del robot se coloca en la posición inicial deseada (referencia). Los ejes de las articulaciones deben ser paralelos a uno de los ejes del marco de coordenadas de referencia $x_0-y_0-z_0$ adjunto a la base del robot. En la pose de referencia todos los valores de las variables conjuntas son iguales a cero, $\theta_i = 0$ y $d_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$;

Paso 2: se seleccionan los centros de las articulaciones $i = 1, 2, \dots, n$. El centro de la articulación i puede estar en cualquier lugar a lo largo del eje de la articulación correspondiente. Un marco de coordenadas locales $x_i-y_i-z_i$ se coloca en el centro de la articulación de tal manera que sus ejes sean paralelos a los ejes del marco de referencia $x_0-y_0-z_0$. El marco de coordenadas local $x_i-y_i-z_i$ se desplaza junto con el segmento i ;

paso 3: el vector de unión unitario e_i se asigna a cada eje de unión $i = 1, 2, \dots, n$. Está dirigido a lo largo de uno de los ejes del marco de coordenadas $x_i-y_i-z_i$. En la dirección de este vector se mide la variable traslacional d_i , mientras que la variable rotacional θ_i se evalúa alrededor del vector conjunto

e_i ; paso 4 —se dibujan los vectores segmento b_{i-1} entre los orígenes de los marcos $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots, n$. El vector segmento b_n conecta el origen de la trama $x_n-y_n-z_n$ con el punto final del robot.

A veces, se coloca un marco de coordenadas adicional en el punto de referencia de una pinza y se indica como $x_{n+1}-y_{n+1}-z_{n+1}$. No existe ningún grado de libertad entre los marcos $x_n-y_n-z_n$ y $x_{n+1}-y_{n+1}-z_{n+1}$, ya que ambos marcos están unidos al mismo segmento. La transformación entre ellos es por lo tanto constante.

El enfoque del modelado geométrico de los mecanismos de los robots se ilustrará con un ejemplo de un mecanismo de robot con cuatro grados de libertad que se muestra en la figura 3.4. La pose inicial seleccionada del mecanismo junto con las posiciones marcadas de los centros de articulación se presenta en la Fig. 3.5. Los parámetros vectoriales correspondientes y las variables conjuntas se recogen en la Tabla 3.1.

Las variables de rotación θ_1 , θ_2 y θ_4 se miden en los planos perpendiculares a los ejes de articulación e_1 , e_2 y e_4 , mientras que la variable de traslación d_3 se mide a lo largo del eje e_3 . Sus valores son cero cuando el mecanismo del robot está en su posición inicial. En la figura 3.6, el robot manipulador se muestra en una pose en la que las cuatro variables son positivas y distintas de cero. La variable θ_1 representa el ángulo entre el eje inicial y momentáneo y_1 , la variable θ_2 el ángulo entre el eje inicial y momentáneo z_2 , la variable d_3 es la distancia entre la posición inicial y actual del eje x_3 , mientras que θ_4 representa el ángulo entre el Eje x_4 inicial y momentáneo.

Los parámetros vectoriales seleccionados del mecanismo del robot se insertan en las matrices de transformación homogéneas (3.2)–(3.4)

$${}^0H_1 = \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

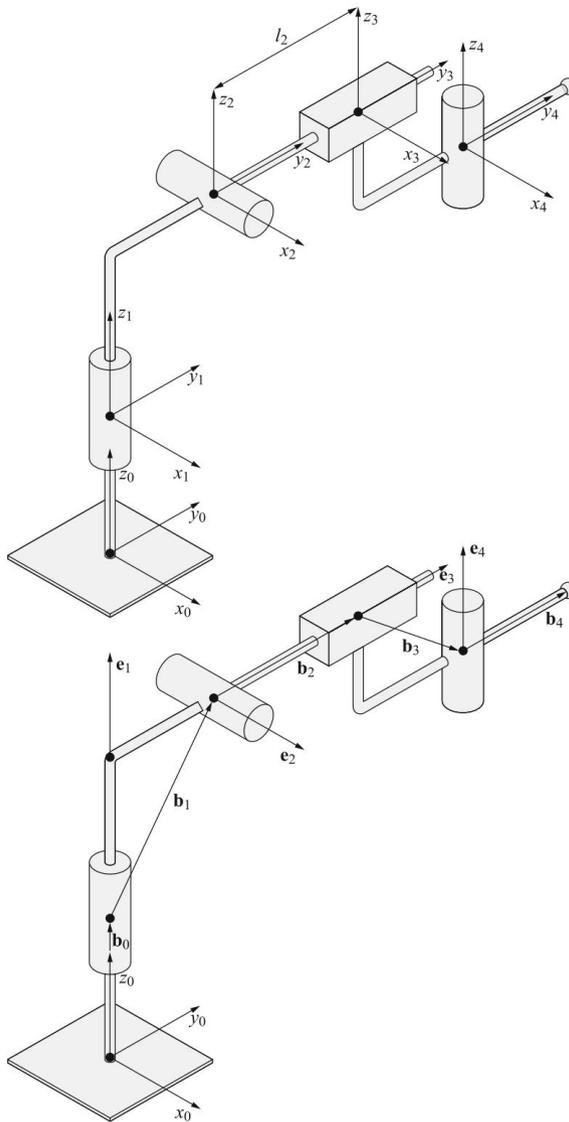


Fig. 3.5 Posicionamiento de los marcos de coordenadas para el mecanismo del robot con cuatro grados de libertad

Una matriz homogénea adicional describe la posición de la referencia de la pinza punto donde se puede asignar el marco de coordenadas x_5 - y_5 - z_5

$${}^4H_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tabla 3.1 Parámetros vectoriales y variables conjuntas para el mecanismo del robot en la Fig. 3.5

yo 1234					
i	1	2	0	4	
di	0	0	d3	0	
yo 1234					
0100					
ei	0	0	1	0	
1001					
i	1	2	3	4	5
0 0 0 0 0					
bi-1	0	l1	l2	l3	l4
0 -h3 0					
h0 h1					

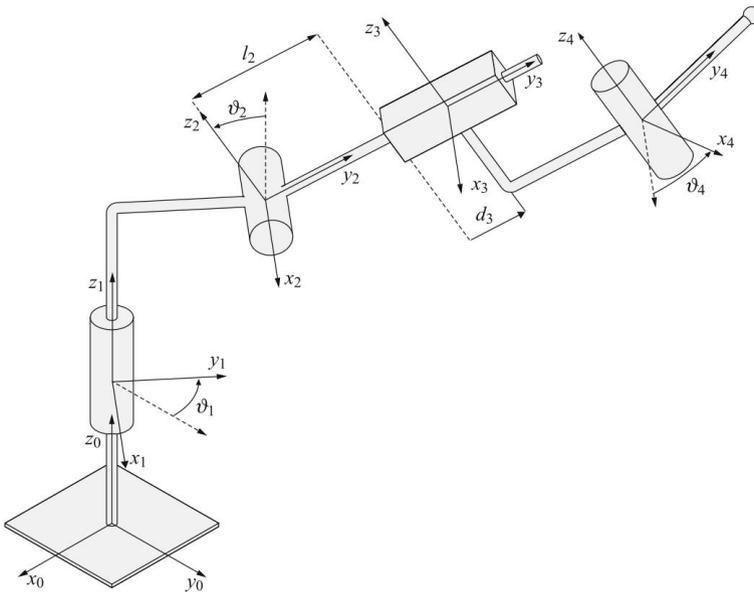


Fig. 3.6 Determinación de las variables de rotación y traslación para el mecanismo del robot con cuatro grados de libertad

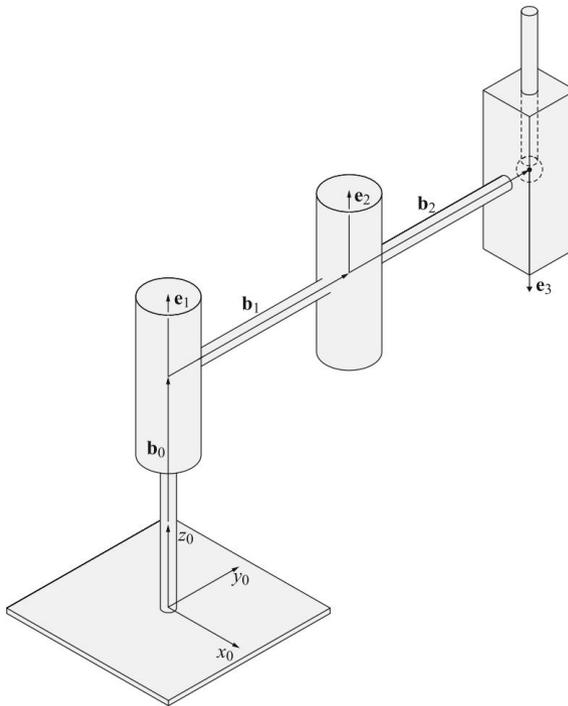


Fig. 3.7 El robot manipulador SCARA en la pose inicial

Esta última matriz es constante ya que los marcos x_4 - y_4 - z_4 y x_5 - y_5 - z_5 son paralelos y están desplazados la distancia l_4 . Por lo general, este marco adicional ni siquiera está unido al mecanismo del robot, ya que la posición y la orientación de la pinza se pueden describir en el marco x_4 - y_4 - z_4 .

Al determinar la pose inicial (de inicio) del mecanismo del robot, debemos tener cuidado de que los ejes de las articulaciones sean paralelos a uno de los ejes del marco de coordenadas de referencia. La pose inicial debe seleccionarse de tal manera que sea simple y fácil de examinar, que se corresponda bien con las tareas previstas del robot y que minimice el número de operaciones matemáticas requeridas incluidas en las matrices de transformación.

Como otro ejemplo, consideraremos el robot manipulador SCARA cuyo modelo geométrico ya se desarrolló en el capítulo anterior y se muestra en la Fig. 2.10.

El mecanismo del robot debe colocarse primero en la pose inicial de tal manera que los ejes de las articulaciones sean paralelos a uno de los ejes del marco de referencia x_0 - y_0 - z_0 .

De esta forma, los dos segmentos vecinos son paralelos o perpendiculares. La junta de traslación debe estar en su posición inicial ($d_3 = 0$). El robot SCARA en la pose inicial seleccionada se muestra en la Fig. 3.7.

Los marcos de coordenadas conjuntas x_i - y_i - z_i son todos paralelos al marco de referencia. Por lo tanto, dibujaremos solo el marco de referencia y haremos que los puntos indiquen los centros de las articulaciones. En los centros de ambas juntas de rotación se colocan los vectores unitarios e_1 y e_2

Tabla 3.2 Parámetros vectoriales y variables articulares para el robot manipulador SCARA

yo 1234							
i	1	2	0	4			
di	0	0	d3	0			
yo 1234							
0100							
ei	0	0	1	0			
1001							
i	1	2	3	4	5		
0 00 0 0							
bi-1	0	I1	I2	I3	I4	h0	h1
0 -h3 0							

a lo largo de los ejes de articulación. La rotación alrededor del vector e_1 está descrita por la variable θ_1 , mientras que θ_2 representa el ángulo alrededor del vector e_2 . El vector e_3 se coloca a lo largo del eje de traslación de la tercera articulación. Su variable de traducción está descrita por d_3 . La primera articulación está conectada a la base del robot por el vector b_0 . El vector b_1 conecta la primera y la segunda articulación y el vector b_2 la segunda y la tercera articulación. Las variables y vectores están reunidos en las tres tablas (Tabla 3.2).

En nuestro caso todos los vectores e_i son paralelos al eje z_0 , por lo que las matrices de transformación homogéneas se escriben según la Ec. (3.4). Se obtienen matrices similares para ambas juntas de rotación.

$${}^0H_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & I_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1H_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & I_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para la articulación de traslación, $d_3 = 0$ debe insertarse en la ecuación. (3.4), dando

$${}^2H_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & l_3 \\ 0 & 0 & 1 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Con la posmultiplicación de las tres matrices se obtiene el modelo geométrico del robot SCARA

$${}^0H_3 = {}^0H_1 {}^1H_2 {}^2H_3 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & -l_3 s_{12} - l_2 s_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_3 c_{12} + l_2 c_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Obtuvimos el mismo resultado que en el capítulo anterior, pero de una forma mucho más sencilla y clara.

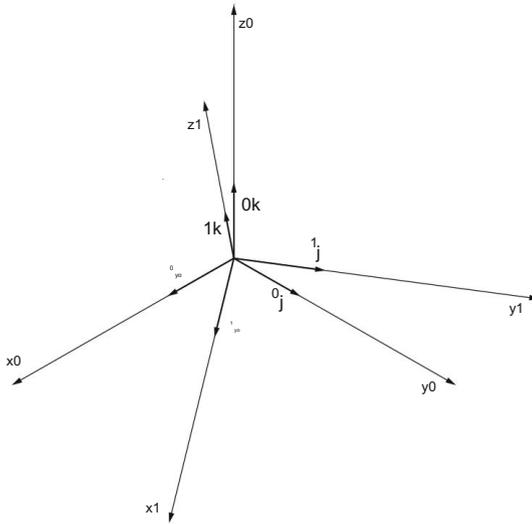


Fig. 4.1 Orientación del marco de coordenadas $x_1-y_1-z_1$ con respecto al marco de coordenadas de referencia $x_0-y_0-z_0$

0i , 0j , y 0k y el marco rotado $x_1-y_1-z_1$ con los vectores unitarios 1j , y 1k . 1i , 1j , 1k
 Ambos marcos de coordenadas coinciden en el mismo origen. Como estamos tratando con los vectores unitarios, los elementos de la matriz de rotación/orientación son simplemente los cosenos de los ángulos pertenecientes a cada par de ejes.

Consideremos el ejemplo de la figura 4.2 y calculemos la matriz que representa la orientación del marco $x_1-y_1-z_1$, que gira el ángulo θ con respecto al marco $x_0-y_0-z_0$.

Estamos tratando con los siguientes productos distintos de cero de los vectores unitarios

$$\begin{aligned}
 {}^0i \cdot {}^0i &= 1, \\
 {}^0j \cdot {}^0j &= \cos \theta, \\
 {}^0k \cdot {}^0k &= \cos \theta, \\
 {}^0j \cdot {}^0k &= -\sin \theta, \\
 {}^0k \cdot {}^0j &= \sin \theta.
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Por lo tanto, la matriz que describe la orientación del marco $x_1-y_1-z_1$ con respecto a $x_0-y_0-z_0$ es

$$\text{prescripción} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c & -s \\ 0 & s & c \end{pmatrix} \tag{4.3}$$

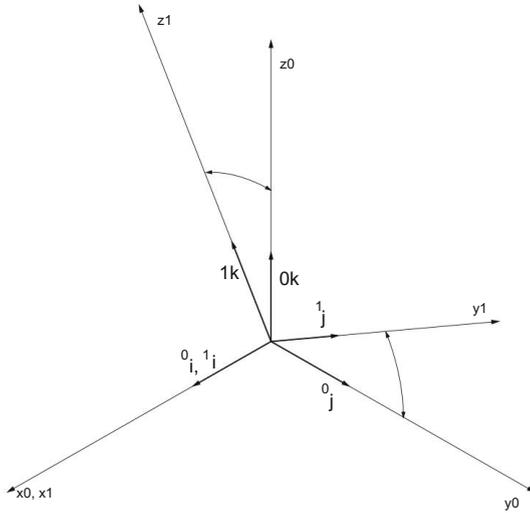
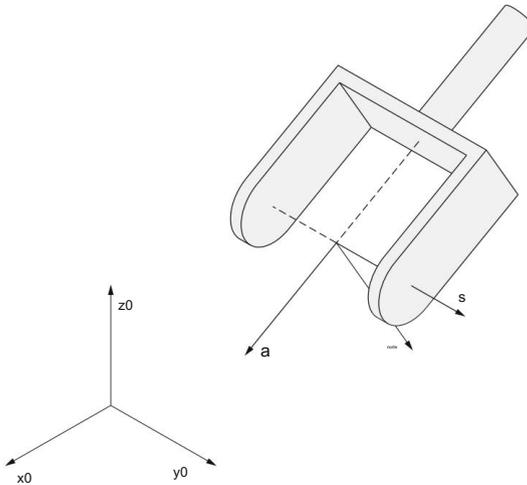
Fig. 4.2 Dos marcos de coordenadas girados sobre el eje x_0 

Fig. 4.3 Orientación de la pinza del robot

La matriz (4.3) puede interpretarse también como la matriz de rotación alrededor del eje x que ya conocemos como parte de la matriz homogénea (2.6) del segundo capítulo.

La noción de orientación en robótica se relaciona principalmente con la orientación de la pinza del robot. Un marco de coordenadas con tres vectores unitarios n , s y a , que describe la orientación de la pinza, se coloca entre dos dedos de una pinza robótica simple (figura 4.3).

El vector del eje z se encuentra en la dirección de aproximación de la pinza al objeto. Por lo tanto, se denota por el vector a (aproximación). Vector, que está alineado con el eje y , describe la dirección de deslizamiento de los dedos y se denota como s (deslizar). El tercer vector completa el marco de coordenadas diestro y se llama normal. Esto se puede mostrar como $n = s \times a$. La matriz que describe la orientación de la pinza con respecto al marco de referencia $x_0-y_0-z_0$ tiene la siguiente forma

$$R = \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

El elemento n_x de la matriz (4.3) denota la proyección del vector unitario n sobre el eje x_0 del marco de referencia. Es igual al coseno del ángulo entre los ejes i de la y y tiene el mismo significado que la matriz del 0_1 rotación/orientación x y x_0 elemento (4.1). Lo mismo es válido para los otros ocho elementos de la matriz de orientación R (4.3).

Para describir la orientación de un objeto no necesitamos nueve elementos de la matriz. El vector de la columna de la izquierda es el producto cruzado de los vectores s y a . Los vectores s y a son vectores unitarios perpendiculares entre sí, por lo que tenemos

$$\begin{aligned} s \cdot s &= 1, \\ a \cdot a &= 1, \\ s \cdot a &= 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Por lo tanto, tres elementos son suficientes para describir la orientación. Esta orientación a menudo se describe mediante la siguiente secuencia de rotaciones

R - balanceo - sobre el eje
z, P - cabeceo - sobre el eje
y, Y - guiñada - sobre el eje x.

Esta descripción se usa principalmente cuando se describe la orientación de un barco o un avión. Imaginemos que el avión vuela a lo largo del eje z y que el marco de coordenadas está ubicado en el centro del avión. Entonces, R representa la rotación alrededor del eje z , P se refiere a la rotación alrededor del eje y y Y a la rotación ψ alrededor del eje x , como se muestra en la figura 4.4.

El uso de los ángulos RPY para una pinza robótica se muestra en la Fig. 4.5. Como se puede comprender a partir de las Figs. 4.4 y 4.5, la orientación RPY se define con respecto a un marco de coordenadas fijo. Al desarrollar el modelo geométrico del robot manipulador SCARA en el segundo capítulo, postmultiplicamos las matrices de transformación homogéneas que describen la rotación (o traslación) de cada articulación en particular. La posición y orientación de cada marco articular se definió con respecto al marco precedente, perteneciente al eje articular que no es fijo. En este caso, como

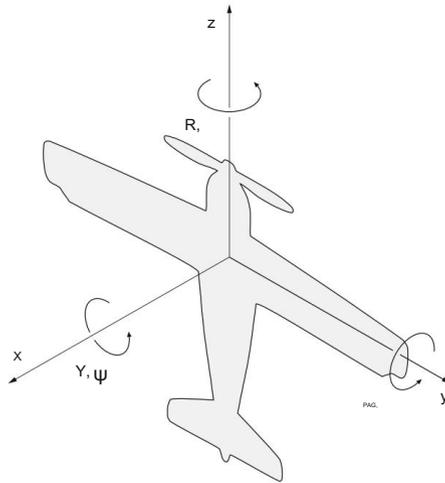


Fig. 4.4 Ángulos RPY para el caso de un avión

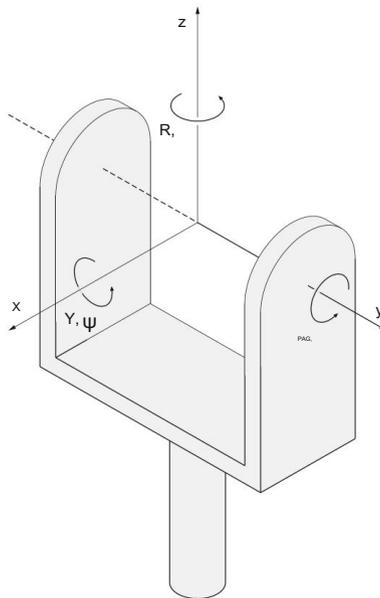


Fig. 4.5 Ángulos RPY para el caso de pinza robótica

hemos visto, estamos multiplicando las matrices de izquierda a derecha. cuando estamos tratando con rotaciones consecutivas sobre los ejes del mismo marco de coordenadas, hacemos uso de la premultiplicación de las matrices de rotación. En otras palabras, las multiplicaciones se realizan en el orden inverso de derecha a izquierda.

Empezamos con la rotación sobre el eje z , continuamos con la rotación sobre el eje y y terminamos con la rotación ψ sobre el eje x . El orden inverso de las rotaciones también es evidente a partir de la denominación de los ángulos RPY. La matriz de orientación, que pertenece a los ángulos RPY, se obtiene de la siguiente multiplicación de las matrices de rotación

$$\begin{aligned}
 R(\alpha, \beta, \psi) &= \text{Rot}(z, \alpha) \text{Rot}(y, \beta) \text{Rot}(x, \psi) = \\
 &= \begin{pmatrix} c & -s & 0 & c & 0 & s & 10 & 0 \\ s & c & 0 & 0 & 10 & 0 & c\psi & -s\psi \\ 0 & 0 & 1 & -s & 0 & c & 0 & s\psi & c\psi \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} c & c & c & s & s\psi & -s & c\psi & c & s & c\psi & +s & s\psi \\ s & s & s & s & s\psi & +c & c\psi & s & s & c\psi & -c & c\psi \\ -s & c & c\psi & c & s\psi \end{pmatrix} \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

La ecuación (4.6) calcula la matriz de rotación a partir de los ángulos RPY correspondientes.

Aprendimos que la rotación y la orientación pueden describirse mediante matrices de rotación o mediante ángulos RPY. En el primer caso necesitamos 9 parámetros, mientras que en el último caso solo se requieren 3 parámetros. Si bien las matrices son convenientes para los cálculos, sin embargo, no brindan una imagen rápida y clara de, por ejemplo, la orientación de la pinza de un robot dentro de un espacio. Los ángulos RPY y Euler presentan muy bien la orientación de una pinza, pero no son apropiados para los cálculos. En este capítulo aprenderemos que los cuaterniones son apropiados tanto para el cálculo como para la descripción de la orientación.

Los cuaterniones representan la extensión de los números complejos

$$z = a + ib, \quad (4.7)$$

donde i significa la raíz cuadrada de -1 , por lo tanto $i^2 = -1$. Los números complejos se pueden presentar geoméricamente en un plano introduciendo un marco rectangular con eje e (real) y m (imaginario). Al pasar del plano al espacio, se deben agregar dos vectores unitarios j y k a i ya existentes. La siguiente igualdad $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ también es válida. El cuaternión tiene la siguiente forma

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k. \quad (4.8)$$

En la Ec. (4.8) q_i son números reales, mientras que i, j y k corresponden a los vectores unitarios a lo largo de los ejes del marco de coordenadas rectangulares.

Al describir la orientación por los ángulos RPY, se necesitaban las multiplicaciones de las matrices de rotación. De manera similar necesitamos multiplicar los cuaterniones

$$pq = (p_0 + p_1i + p_2j + p_3k)(q_0 + q_1i + q_2j + q_3k). \quad (4.9)$$

Tabla 4.1 Reglas para multiplicaciones de cuaterniones

*	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	-j
j	j	-k	-1	i
k	k	j	-i	-1

La multiplicación de cuaterniones no es conmutativa. Al multiplicar dos cuaterniones haremos uso de la Tabla 4.1. Multipliquemos dos cuaterniones

$$\begin{aligned}
 (2 + 3i - j + 5k)(3 - 4i + 2j + k) &= \\
 &= 6 + 9i - 3j + 15k - \\
 &2 - 8i - 12j + 4ji - 20ki + \\
 &+ 4j + 6ij - 2j^2 + 10kj + \\
 &+ 2k + 3ik - jk + 5k^2 = \\
 &= 6 + 9i - 3j + 15k - \\
 &- 8i + 12 - 4k - 20j + \\
 &+ 4j + 6k + 2 - 10i + \\
 &+ 2k - 3j - i - 5 = \\
 &= 15 - 10i - 22j + 19k.
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

La siguiente expresión de un cuaternión es especialmente apropiada para describir el orientación en el espacio

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + \text{seno} \frac{\theta}{2} \mathbf{n} \tag{4.11}$$

En la Ec. (4.11) \mathbf{n} es un vector unitario alineado con el eje de rotación, mientras que θ es el ángulo de rotación. El cuaternión de orientación se puede obtener a partir de los ángulos RPY. Rotación R está descrito por el cuaternión

$$q_z = \cos \frac{\theta}{2} + \text{seno} \frac{\theta}{2} \mathbf{k} \tag{4.12}$$

El siguiente cuaternión pertenece a la rotación P

$$q_y = \cos \frac{\theta}{2} + \text{seno} \frac{\theta}{2} \mathbf{j} \tag{4.13}$$

mientras que la rotación Y se puede escribir de la siguiente manera

$$\frac{\psi + \sin i}{2} q_{x\psi} = \cos \quad (4.14)$$

Después de multiplicar los tres cuaterniones anteriores (4.12–4.14), la orientación resultante cuaternión se obtiene

$$q(\cdot, \cdot, \psi) = q_z \cdot q_y \cdot q_{x\psi} \quad (4.15)$$

Ilustremos las tres descripciones de la orientación, es decir, los ángulos RPY, la matriz de rotación y los cuaterniones, mediante un ejemplo de descripción de la orientación de la pinza. Para que el ejemplo sea claro y simple, el plano de la pinza de dos dedos se colocará en el plano x_0 – y_0 del marco de referencia (figura 4.6). Los ángulos RPY se pueden leer en la Fig. 4.6. Las rotaciones alrededor de los ejes z e y son iguales a cero. La rotación de -60° alrededor del eje x se puede ver en la Fig. 4.6. La orientación de la pinza se puede, por lo tanto, describir mediante el siguiente conjunto de ángulos RPY

$$\alpha = 0, \quad \beta = 0, \quad \psi = -60^\circ \quad (4.16)$$

De la Fig. 4.6 también podemos leer los ángulos entre los ejes de la referencia y el marco de coordenadas de la pinza. Sus cosenos representan la matriz de orientación/rotación R

$$\begin{aligned} n_x &= \cos 0^\circ, s_x = \cos 90^\circ, a_x = \cos 90^\circ, n_y = \cos 90^\circ, s_y = \cos 60^\circ, a_y = \cos 30^\circ, n_z = \cos 0^\circ, s_z = \cos 150^\circ, a_z = \cos 60^\circ. \end{aligned} \quad (4.17)$$

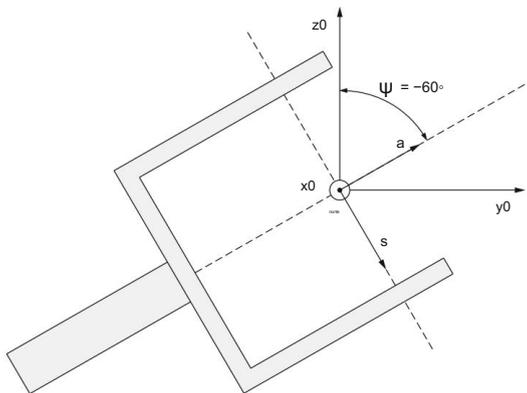


Fig. 4.6 Orientación de la pinza del robot

La matriz R también se puede calcular insertando los ángulos RPY conocidos en la ecuación. (4.6)

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0,866 \\ 0 & -0,866 & 0,5 \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

De esta forma se probó la exactitud de nuestra lectura de los ángulos de la Fig. 4.6 . Calcularemos el cuaternión de orientación insertando los ángulos RPY en las Ecs. (4.12–4.14)

$$\begin{aligned} q_z &= 1 + 0k, \\ q_y &= 1 + 0j, \\ q_x &= 0,866 - 0,5i. \end{aligned} \quad (4.19)$$

El cuaternión de orientación se obtiene después de multiplicar los tres cuaterniones anteriores (4.15)

$$q_0 = 0,866, q_1 = -0,5, q_2 = 0, q_3 = 0. \quad (4.20)$$

Las ecuaciones (4.16), (4.18) y (4.20) demuestran tres descripciones diferentes de la misma orientación de la pinza.

Capítulo 5

Manipulador de robot de dos segmentos



5.1 Cinemática

La cinemática es parte de la mecánica clásica que estudia el movimiento sin considerar las fuerzas responsables de este movimiento. En general, el movimiento se describe mediante trayectorias, velocidades y aceleraciones. En robótica estamos principalmente interesados en trayectorias y velocidades, ya que ambas pueden ser medidas por los sensores de articulación. En las articulaciones de los robots, las trayectorias se miden como el ángulo en una articulación de rotación o como la distancia en una articulación de traslación. Las variables conjuntas también se denominan coordenadas internas. Al planificar y programar una tarea de robot, la trayectoria del punto final del robot es de suma importancia. La posición y orientación del efector final se describen mediante coordenadas externas. El cálculo de variables externas a partir de variables internas, y viceversa, es el problema central de la cinemática de robots.

En este capítulo limitaremos nuestro interés a un manipulador robótico plano de dos segmentos con dos juntas rotacionales (figura 5.1). De acuerdo con la definición dada en el capítulo introductorio, tal mecanismo difícilmente puede llamarse robot. Sin embargo, este mecanismo es una parte importante de las estructuras de robots SCARA y antropomórficos y nos permitirá estudiar varias propiedades características del movimiento de los mecanismos de los robots.

Hay una distinción entre cinemática directa e inversa. cinemática directa en el caso de un robot de dos segmentos representa el cálculo de la posición del punto final del robot a partir de los ángulos de articulación conocidos. La cinemática inversa calcula las variables conjuntas desde la posición conocida del punto final del robot. La cinemática directa representa el problema más simple, ya que tenemos una única solución para la posición del punto final del robot. Las soluciones de la cinemática inversa dependen en gran medida de la estructura del robot manipulador. A menudo tratamos con varias soluciones para las variables conjuntas que dan como resultado la misma posición del punto final del robot, mientras que en algunos casos no existe una solución analítica de cinemática inversa.

El análisis cinemático incluye también las relaciones entre la velocidad del punto final del robot y las velocidades de las articulaciones individuales. Encontraremos que la cinemática inversa para velocidades es más simple que la cinemática inversa para trayectorias. Primero encontraremos el

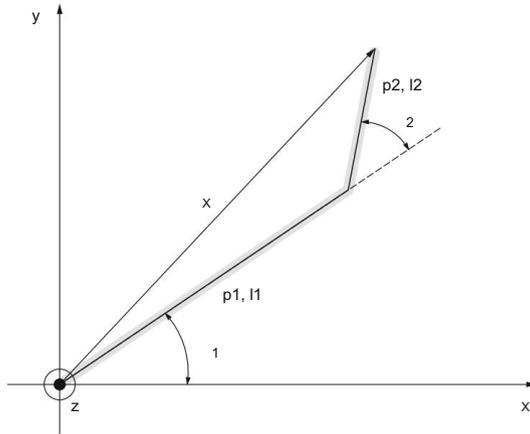


Fig. 5.1 Robot manipulador planar de dos segmentos

solución de cinemática directa para las trayectorias. Por diferenciación obtenemos las ecuaciones que describen la cinemática directa de las velocidades. Por simple inversión de matriz se puede calcular la cinemática inversa para velocidades. Consideremos ahora el robot manipulador plano de dos segmentos que se muestra en la figura 5.1.

El eje de rotación de la primera articulación está representado por el eje vertical z que apunta fuera del avión. El vector p_1 se dirige a lo largo del primer segmento

$$p_1 = l_1 \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \\ \text{sen } \theta_1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

El vector p_2 está junto con el segundo segmento. Sus componentes se pueden leer en la Fig. 5.1

$$p_2 = l_2 \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

El vector x conecta el origen del marco de coordenadas con el punto final del robot

$$x = p_1 + p_2. \quad (5.3)$$

Entonces tenemos para la posición del punto final del robot

$$x = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \text{sen } \theta_1 + l_2 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Definiendo el vector de ángulos articulares

$$q = \begin{pmatrix} \theta_1 & \theta_2 \end{pmatrix}^T, \quad (5.5)$$

la ecuación (5.4) se puede escribir de la siguiente forma más corta

$$\dot{x} = k(q), \quad (5.6)$$

donde $k(\cdot)$ representa las ecuaciones de la cinemática directa.

La relación entre las velocidades del punto final del robot y las velocidades de las articulaciones es obtenido por diferenciación. Las coordenadas del punto final son funciones de la ángulos articulares, que a su vez son funciones del tiempo

$$\begin{aligned} x &= x(\theta_1(t), \theta_2(t)) \\ y &= y(\theta_1(t), \theta_2(t)). \end{aligned} \quad (5.7)$$

Calculando las derivadas temporales de la ec. (5.7) y organizándolos en forma de matriz, podemos escribir

$$\begin{matrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{matrix} \begin{matrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{matrix}. \quad (5.8)$$

Para nuestro robot manipulador de dos segmentos obtenemos la siguiente expresión

$$\begin{matrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{matrix} = \begin{matrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} \end{matrix} \begin{matrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{matrix}. \quad (5.9)$$

La matriz, que en nuestro caso es de segundo orden, se llama matriz jacobiana $J(q)$. La relación (5.9) se puede escribir en forma abreviada como

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (5.10)$$

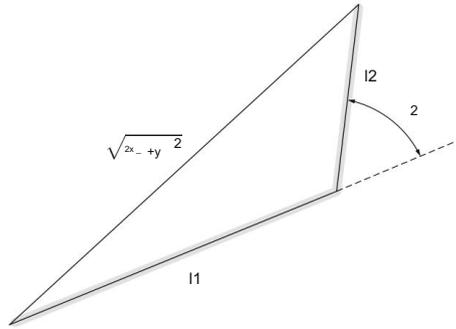
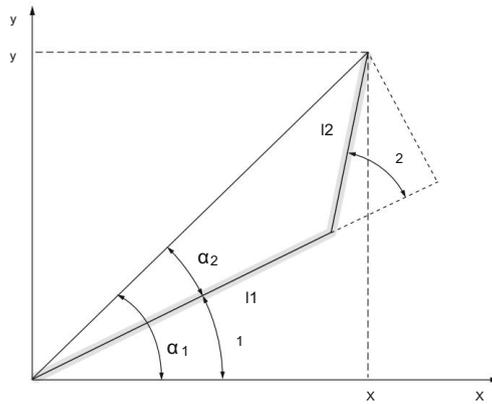
De esta forma se resuelven los problemas de cinemática directa para trayectorias y velocidades.

Al resolver la cinemática inversa, calculamos los ángulos de las articulaciones a partir de los posición del punto final del robot. La Figura 5.2 muestra solo aquellos parámetros del mecanismo del robot de dos segmentos que son relevantes para el cálculo del ángulo θ_2 . El se usa la regla del coseno

$$x_{2-}^2 + y^2 = y_{o1}^2 + y_{o2}^2 - 2l_1l_2 \cos(180^\circ - \theta_2), \quad (5.11)$$

donde $-\cos(180^\circ - \theta_2) = \cos(\theta_2)$. El ángulo del segundo segmento del manipulador de dos segmentos se calcula como la función trigonométrica inversa

$$\theta_2 = \arccos \frac{x_{2-}^2 + y^2 - y_{o1}^2 - y_{o2}^2}{2l_1l_2}. \quad (5.12)$$

Fig. 5.2 Cálculo del ángulo α_2 Fig. 5.3 Cálculo del ángulo α_1

El ángulo del primer segmento se calcula con la ayuda de la Fig. 5.3. se obtiene como la diferencia de los ángulos α_1 y α_2

$$\alpha_1 = \alpha_1 - \alpha_2.$$

El ángulo α_1 se obtiene del triángulo rectángulo formado por x horizontales y coordenadas verticales y del punto final del robot. El ángulo α_2 se obtiene alargando el triángulo de la figura 5.2 en el triángulo rectángulo, como se muestra en la figura 5.3. otra vez nosotros hacer uso de las funciones trigonométricas inversas

$$\alpha_1 = \arctan \frac{y}{x} - \arctan \frac{l_2 \sin \alpha_2}{l_1 + l_2 \cos \alpha_2}. \quad (5.13)$$

Al calcular el ángulo α_2 , tenemos dos soluciones, codo hacia arriba y codo hacia abajo, como se muestra en la Fig. 5.4. Una solución degenerada está representada por el punto final

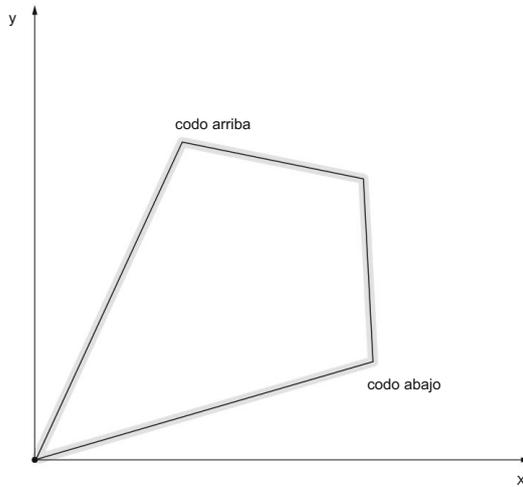


Fig. 5.4 Dos soluciones de cinemática inversa

posición $x = y = 0$ cuando ambos segmentos tienen la misma longitud $l_1 = l_2$. En este caso, la relación $\frac{y}{x}$ no está definida. Cuando el ángulo $\theta_2 = 180^\circ$, la base del mecanismo simple de dos segmentos se puede alcanzar en un ángulo arbitrario θ_1 . Sin embargo, cuando un punto (x, y) se encuentra fuera del espacio de trabajo del manipulador, el problema de la cinemática inversa no se puede resolver.

La relación entre las velocidades conjuntas y la velocidad del punto final se obtiene invirtiendo la matriz jacobiana $J(q)$

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \dot{x} \quad (5.14)$$

Las matrices de orden 2×2 se pueden invertir de la siguiente manera

$$\text{un} = \begin{matrix} a & B \\ C & D \end{matrix} \quad A^{-1} = \frac{1}{\text{anuncio} - cb} \begin{matrix} re-b & \\ & -ca \end{matrix} .$$

Para nuestro manipulador de dos segmentos podemos escribir

$$\begin{matrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{matrix} = \begin{matrix} 1 & l_2 c_2 \\ l_1 s_2 & c_2 - l_1 s_2 \end{matrix} \begin{matrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{matrix} \quad (5.15)$$

En ejemplos generales de manipuladores de robots, no es necesario que la matriz jacobiana tenga la forma cuadrática. En este caso, se calcula la llamada matriz pseudoinversa $(JJ^T)^{-1}$. Para un robot con seis grados de libertad, la matriz jacobiana es cuadrática; sin embargo, después de invertirla, se vuelve poco práctica. Cuando el manipulador está cerca

a poses singulares (por ejemplo, cuando el ángulo θ_2 es cercano a cero para el robot simple de dos segmentos), la matriz jacobiana inversa está mal definida. Haremos uso de la matriz jacobiana cuando estudiemos el control de robots.

5.2 Estática

Después del final de la sección de cinemática del robot, demos un pequeño salto a la estática del robot. Supongamos que el punto final del robot manipulador de dos segmentos choca contra un obstáculo (Fig. 5.5). De esta forma el robot está produciendo una fuerza contra el obstáculo. La componente horizontal de la fuerza actúa en la dirección positiva del eje x , mientras que la componente vertical se dirige a lo largo del eje y . La fuerza contra el obstáculo la producen los motores en las articulaciones del robot. El motor de la primera junta produce el par M_1 , mientras que M_2 es el par de la segunda junta.

Las direcciones positivas de ambos pares de torsión son en sentido contrario a las agujas del reloj. Como el robot no se mueve, la suma de los pares externos es igual a cero. Esto quiere decir que el par M_1 en la primera articulación es igual al par de la fuerza externa o es igual al par que ejerce el manipulador sobre el obstáculo

$$M_1 = -F_x y + F_y x. \quad (5.16)$$

Las coordenadas x e y del punto final, calculadas por la ecuación. (5.4), se insertan en la ecuación. (5.16)

$$M_1 = -F_x (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) + F_y (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)). \quad (5.17)$$

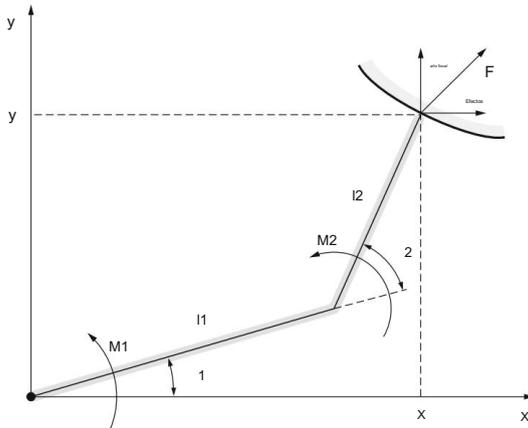


Fig. 5.5 Robot manipulador de dos segmentos en contacto con el entorno

De manera similar se determina el par en la segunda articulación.

$$M_2 = -F_x l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_y l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2). \quad (5.18)$$

Las ecuaciones (5.17) y (5.18) se pueden escribir en forma matricial

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{12} & l_2 c_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -F_x l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + F_y l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}. \quad (5.19)$$

La matriz en la ecuación (5.19) es una matriz jacobiana transpuesta. La matriz transpuesta de orden 2×2 tiene la siguiente forma

$$A^T = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$$

De esta manera obtuvimos una relación importante entre los pares de torsión y las fuerzas en el efector final del robot.

$$\tau = J^T(q) f, \quad (5.20)$$

dónde

$$\tau = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix}$$

La ecuación (5.20) describe la estática del robot. Se utilizará en el control de un robot que está en contacto con el medio ambiente.

5.3 Espacio de trabajo

El espacio de trabajo del robot consta de todos los puntos a los que puede llegar el punto final del robot. Desempeña un papel importante a la hora de seleccionar un robot industrial para una tarea prevista. Nuestro objetivo es describir un enfoque para determinar el espacio de trabajo de un robot elegido. Consideraremos nuevamente el ejemplo del robot plano simple de dos segmentos con juntas rotacionales. Por lo tanto, nuestro estudio del espacio de trabajo del robot tendrá lugar en un plano y, de hecho, nos ocuparemos de una superficie de trabajo. Independientemente de las restricciones impuestas por el plano, nos daremos cuenta de las propiedades características más importantes de los espacios de trabajo del robot. Los robots industriales suelen tener la capacidad de girar alrededor del primer eje de articulación vertical. Por lo tanto, rotaremos la superficie de trabajo alrededor del eje vertical del marco de coordenadas de referencia y así obtendremos una idea de los espacios de trabajo tridimensionales realistas del robot.

Consideremos el robot manipulador plano de dos segmentos que se muestra en la figura 5.6. Los grados de libertad de rotación se denotan como θ_1 y θ_2 . Las longitudes de los segmentos l_1 y l_2 se considerarán iguales. Las coordenadas del punto final del robot se pueden expresar como en (5.4) con las siguientes dos ecuaciones:

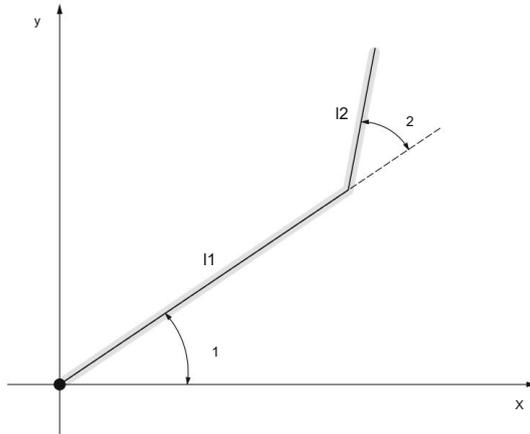


Fig. 5.6 Robot manipulador de dos segmentos

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (5.21)$$

Si las Ecs. (5.21) primero se elevan al cuadrado y luego se suman, se obtienen las ecuaciones de un círculo

$$\begin{aligned} (x - l_1 \cos \theta_1)^2 + (y - l_1 \sin \theta_1)^2 &= l_2^2 \\ x^2 + y^2 &= l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (5.22)$$

La primera ecuación depende solo del ángulo θ_1 , mientras que en la segunda ecuación solo aparece θ_2 . La malla de los círculos trazados para diferentes valores θ_1 y θ_2 se muestra en la Fig. 5.7. La primera ecuación describe los círculos que están en la Fig. 5.7 indicados como $\theta_1 = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, \text{ y } 180^\circ$. Sus radios son iguales a la longitud del segundo segmento l_2 , los centros de los círculos dependen del ángulo θ_1 y recorren un círculo con el centro en el origen del sistema de coordenadas y con el radio l_1 . Las circunferencias de la segunda ecuación tienen todos sus centros en el origen del marco de coordenadas, mientras que sus radios dependen de las longitudes de ambos segmentos y del ángulo θ_2 entre ellos.

La malla de la figura 5.7 sirve para una presentación gráfica simple de la superficie de trabajo de un robot de dos segmentos. No es difícil determinar la superficie de trabajo para el caso en que θ_1 y θ_2 varían en el rango completo de 0° a 360° . Para el manipulador de dos segmentos con longitudes iguales de ambos segmentos, esto es simplemente un círculo con el radio $l_1 + l_2$. Se obtienen formas mucho más irregulares de los espacios de trabajo cuando se restringe el rango de movimiento de las articulaciones del robot, como suele ser el caso. La parte de la superficie de trabajo donde θ_1 cambia de 0° a 60° y θ_2 de 60° a 120° se muestra sombreada en la Fig. 5.7.

Al trazar las superficies de trabajo del manipulador de dos segmentos, asumimos que las longitudes de ambos segmentos son iguales. Esta suposición será ahora apoyada por

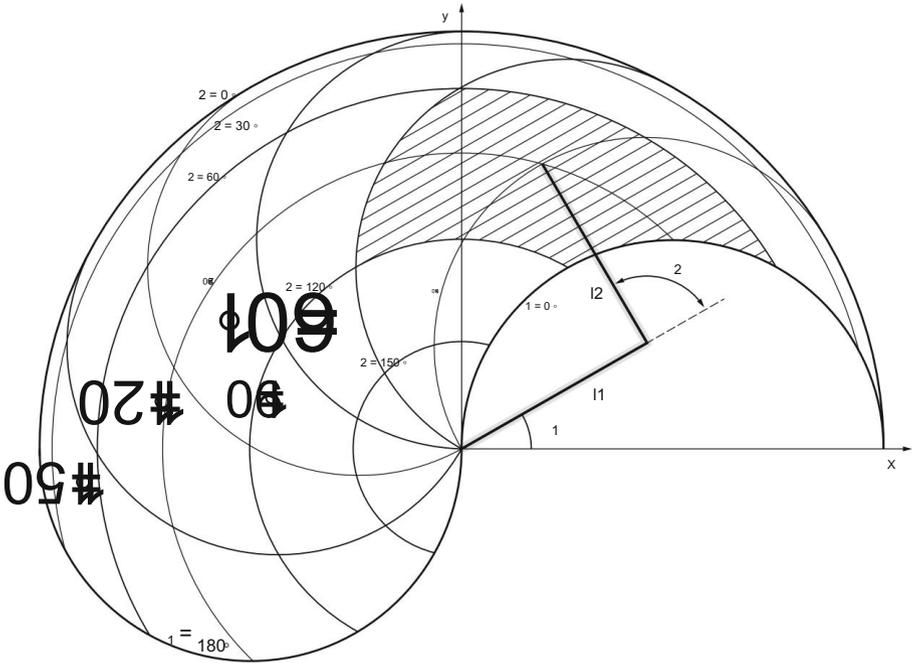


Fig. 5.7 Espacio de trabajo de un robot manipulador plano de dos segmentos ($l_1 = l_2$, $0^\circ \leq \alpha_1 \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \alpha_2 \leq 180^\circ$)

una prueba adecuada. No es difícil darse cuenta de que los segmentos de los SCARA industriales y los robots antropomórficos tienen la misma longitud. Consideremos un robot de dos segmentos, donde el segundo segmento es más corto que el primero, mientras que los ángulos α_1 y α_2 varían de 0° a 360° (Fig. 5.8). El área de trabajo de dicho manipulador es un anillo con radio interior $R_i = l_1 - l_2$ y radio exterior $R_o = l_1 + l_2$. Nuestro objetivo es encontrar la relación de las longitudes de los segmentos l_1 y l_2 que dan como resultado el área de trabajo más grande en la suma constante de las longitudes de ambos segmentos R_o . El área de trabajo del robot manipulador de dos segmentos descrito es

$$A = \pi R_o^2 - \pi R_i^2 \tag{5.23}$$

Al insertar la expresión para el radio interior en la ecuación. (5.23)

$$A = \pi R_o^2 - \pi (l_1 - l_2)^2 = \pi (2l_1 - R_o)^2 \tag{5.24}$$

podemos escribir

$$A = \pi R_o^2 - \pi (2l_1 - R_o)^2 \tag{5.25}$$

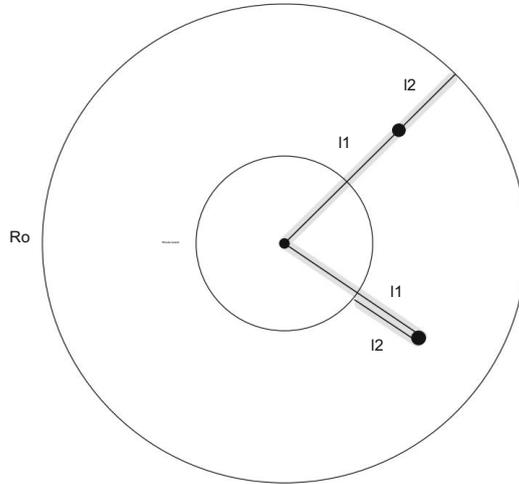


Fig. 5.8 Área de trabajo del manipulador de dos segmentos con el segundo segmento más corto

Para un área máxima, la derivada con respecto a la longitud del segmento I1 debe ser igual a cero

$$\frac{\partial}{\partial I_1} A = 2\pi(2I_1 - R_o) = 0 \quad (5.26)$$

La solución es

$$I_1 = \frac{R_o}{2} \quad (5.27)$$

donación

$$I_1 = I_2 \quad (5.28)$$

El área de trabajo más grande del mecanismo de dos segmentos ocurre para longitudes iguales de ambos segmentos.

El área de la superficie de trabajo depende de las longitudes de los segmentos I1 y I2 y de los valores mínimo y máximo de los ángulos θ_1 y θ_2 . Al cambiar las relaciones I1/I2 podemos obtener varias formas de la superficie de trabajo del robot. El área de dicha superficie de trabajo siempre es igual a la que se muestra en la Fig. 5.9. En esta figura, $\Delta \theta_1$ se refiere a la diferencia entre el valor máximo y mínimo del ángulo de articulación $\Delta \theta_1 = (\theta_{1\max} - \theta_{1\min})$. El área de la superficie de trabajo es el área de un segmento de anillo

$$A = \frac{\Delta \theta_1}{360} \pi (r_1^2 - r_2^2) \quad (5.29)$$

para $\Delta \theta_1$ dado en grados angulares.

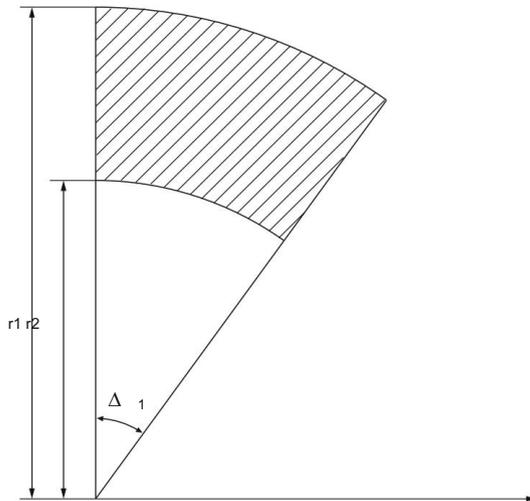


Fig. 5.9 Superficie de trabajo de un manipulador de dos segmentos

En la ecuación. (5.29), los radios r_1 y r_2 se obtienen por la regla del coseno

$$r_1 = l_1 \sqrt{\frac{l_2^2 + y_0^2 + 2l_1l_2 \cos \alpha}{2l_1}} \quad r_2 = l_1 \sqrt{\frac{l_2^2 + y_0^2 + 2l_1l_2 \cos \alpha}{2l_2}} \quad (5.30)$$

El área de la superficie de trabajo depende, al igual que su forma, de la relación l_2/l_1 y de las restricciones en los ángulos de las articulaciones. El ángulo α determina la posición de la superficie de trabajo con respecto al marco de referencia y no tiene influencia en su forma. Examinemos la influencia del segundo ángulo α en el área de la superficie de trabajo. Supondremos que $l_1 = l_2 = 1$ y α cambia de 30° a 60° .

Para rangos iguales del ángulo α (30°) y para diferentes valores de α_{\max} y α_{\min} obtenemos diferentes valores de las áreas de trabajo

$$\begin{aligned} 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ & A = 0,07 \\ 30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ & A = 0,19 \\ 60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ & A = 0,26 \\ 90^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ & A = 0,26 \\ 120^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ & A = 0,19 \\ 150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ & A = 0,07. \end{aligned}$$

Hasta ahora, bajo el término espacio de trabajo entendíamos el llamado espacio de trabajo accesible del robot. Esto incluye todos los puntos del entorno del robot a los que puede llegar el punto final del robot. A menudo, este llamado espacio de trabajo diestro es de mayor importancia. El espacio de trabajo diestro comprende todos los puntos que se pueden alcanzar con cualquier orientación arbitraria del efector final del robot. Este espacio de trabajo es siempre

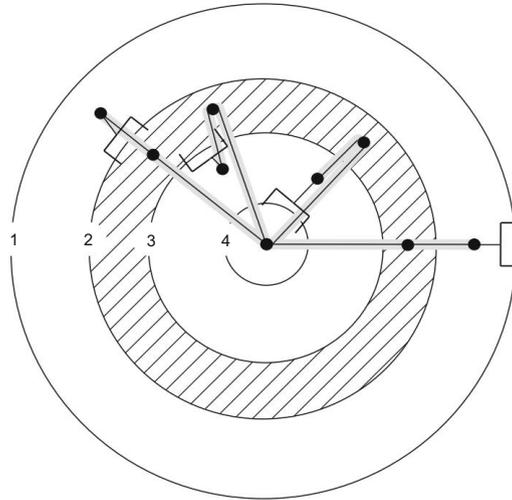


Fig. 5.10 Espacio de trabajo accesible y diestro de un manipulador de dos segmentos con efector final

más pequeño que el espacio de trabajo accesible. El espacio de trabajo diestro es más grande cuando el último segmento (efector final) es más corto. Los espacios de trabajo alcanzables y diestros de un robot de dos segmentos con el efector final se muestran en la Fig. 5.10. El segundo y el tercer círculo se obtienen cuando el efector final del robot se orienta hacia el área limitado por los dos círculos. Estos dos círculos representan los límites del espacio de trabajo diestro. El primer y el cuarto círculo restringen el espacio de trabajo accesible. Los puntos entre el primero y el segundo y el tercero y el cuarto círculo no se pueden alcanzar con una orientación arbitraria del efector final.

Para robots que tienen más de tres articulaciones, el enfoque gráfico descrito no es apropiado. En ese caso hacemos uso de métodos numéricos y algoritmos informáticos.

5.4 Dinámica

Con fines ilustrativos, estudiaremos el manipulador robótico plano de dos segmentos como se muestra en la figura 5.11. Los segmentos de longitud l_1 y l_2 pueden moverse en el plano vertical $x-y$, describiéndose sus posiciones por ángulos con respecto al eje horizontal (x); θ_1 y $\theta_2 = \theta_1 + \alpha$. Los actuadores en las juntas proporcionan pares M_1 y M_2 , cuya dirección positiva se define por ángulos crecientes, es decir, a lo largo de la dirección positiva del eje z de nuestro marco de coordenadas de referencia.

Ahora aproximamos los segmentos por masas puntuales m_1 y m_2 en los puntos medios de varillas rígidas, pero por lo demás sin masa (vea la figura 5.12). Sea r_1 la posición de la masa puntual m_1 con respecto a la primera articulación, que está en el origen de nuestro sistema de coordenadas. Sea r_2 la posición de la masa puntual m_2 con respecto a la segunda articulación, que está en la unión de los dos segmentos.

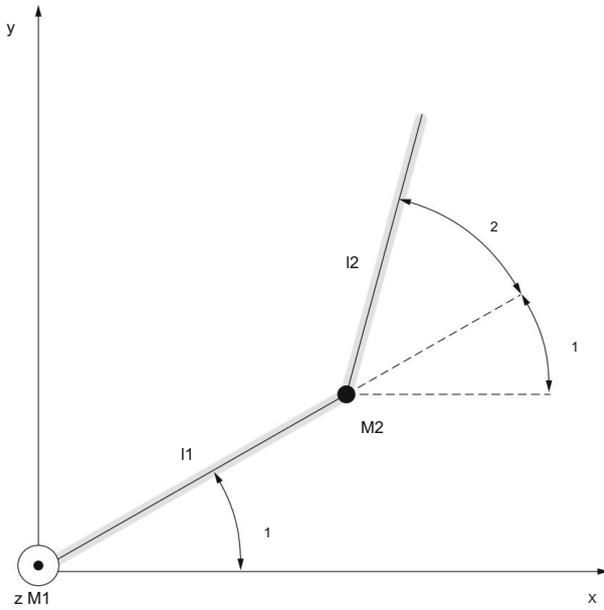


Fig. 5.11 Parámetros del manipulador robótico plano de dos segmentos, que se mueve en el plano vertical x - y

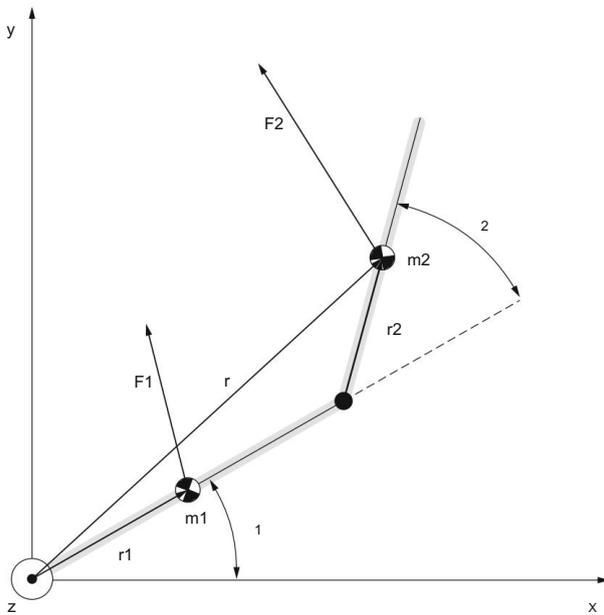


Fig. 5.12 Manipulador de robot planar aproximado por masas puntuales m_1 y m_2

Sobre las masas puntuales m_1 y m_2 actúan las fuerzas que transmiten las varillas sin masa, así como la fuerza de la gravedad. La ley de Newton afirma que la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre una partícula es igual al producto de la masa de la partícula y su aceleración. Por lo tanto,

$$F_1 = m_1 a_1 \text{ y } F_2 = m_2 a_2, \quad (5.31)$$

donde F_1 y F_2 representan las sumas de todas las fuerzas (es decir, la fuerza de la barra y la fuerza de la gravedad), que actúan sobre cada una de las masas puntuales m_1 y m_2 , mientras que a_1 y a_2 son sus aceleraciones con respecto al origen de la marco de coordenadas. Entonces, un cálculo de las aceleraciones equivale a la determinación de las fuerzas en las dos "partículas".

La posición de m_1 con respecto al origen del marco de referencia viene dada por r_1 , mientras que la posición de m_2 viene dada por $r = 2r_1 + r_2$ (ver Fig. 5.12). Por lo tanto, las aceleraciones correspondientes son $a_1 = \ddot{r}_1$ y $a_2 = \ddot{r} = 2\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2$, donde los dos puntos sobre el símbolo del vector indican las segundas derivadas con respecto al tiempo. Por lo tanto,

$$a_1 = \ddot{r}_1 \text{ y } a_2 = \ddot{r} = 2\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2. \quad (5.32)$$

Ahora, r_1 y r_2 representan varillas rígidas, por lo que sus longitudes son fijas. Por lo tanto, estos vectores solo pueden rotar. Recordemos la física básica, que dice que un vector giratorio describe una partícula en movimiento circular. Tal movimiento puede tener dos componentes de aceleración (Fig. 5.13, ver también Apéndice ??). La primera componente es la aceleración radial o centrípeta a_r , que está dirigida hacia el centro de rotación. Se debe únicamente al cambio de la dirección de la velocidad v , por lo tanto, también está presente en el movimiento circular uniforme. viene dada por la expresión

$$a_r = -\omega^2 r, \quad (5.33)$$

donde ω es la velocidad angular $\omega = \dot{\theta}$. El segundo componente es la aceleración tangencial, que se dirige a lo largo de la tangente al círculo (figura 5.13). Se debe al cambio de la magnitud de la velocidad y está presente solo en el movimiento circular con aceleración angular $\alpha = \dot{\omega}$. esta dado por

$$a_t = \alpha \times r, \quad (5.34)$$

donde α es el vector de aceleración angular, que es perpendicular al plano de movimiento, es decir, está a lo largo del eje z de nuestro sistema de coordenadas de referencia. La aceleración total es obviamente

$$a = a_r + a_t = -\omega^2 r + \alpha \times r. \quad (5.35)$$

Calculemos ahora las segundas derivadas con respecto al tiempo de los vectores r_1 y r_2 . Como se señaló anteriormente, cada una de estas derivadas tiene dos componentes correspondientes a la aceleración radial y tangencial. Entonces

$$\ddot{r}_1 = -\omega^2 r_1 + \alpha \times r_1 \text{ y } \ddot{r}_2 = -\omega^2 r_2 + \alpha \times r_2. \quad (5.36)$$

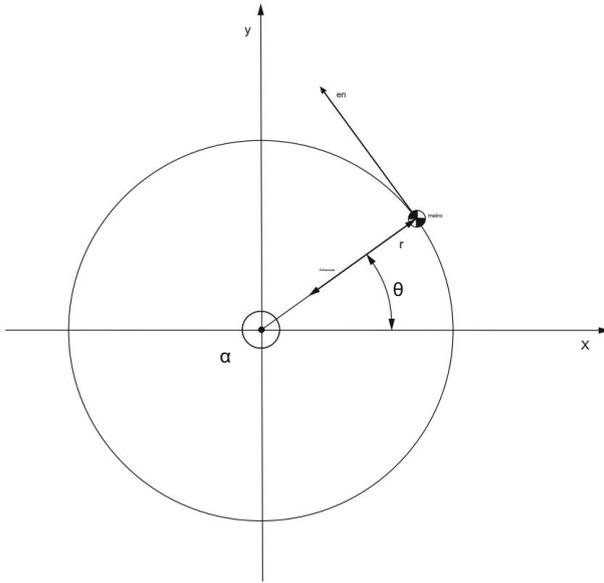


Fig. 5.13 Un vector giratorio r de longitud fija describe una partícula en movimiento circular

La magnitud de la velocidad angular ω_1 y el vector de aceleración angular α_1 del primer segmento son

$$\omega_1 = \dot{\theta}_1 \text{ y } \alpha_1 = \ddot{\theta}_1 k, \quad (5.37)$$

donde k es el vector unitario a lo largo del eje z . La velocidad angular ω_2 y la aceleración angular α_2 del segundo segmento son

$$\omega_2 = \dot{\theta} = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \text{ y } \alpha_2 = \ddot{\theta} k = (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)k. \quad (5.38)$$

Aquí usamos $\dot{\theta} = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2$ (véanse las figuras 5.11 y 5.12). Las segundas derivadas de los vectores r_1 y r_2 pueden escribirse como

$$\ddot{r}_1 = -\omega_1^2 r_1 + \alpha_1 \times r_1 = -\dot{\theta}_1^2 r_1 + \ddot{\theta}_1 k \times r_1 \quad (5.39)$$

y

$$\begin{aligned} \ddot{r}_2 &= -\omega_2^2 r_2 + \alpha_2 \times r_2 = -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 r_2 + (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)k \times r_2 = \ddot{r}_2 \\ &= -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 r_2 + (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)k \times r_2. \end{aligned} \quad (5.40)$$

Ahora podemos usar estas expresiones para calcular las aceleraciones de las dos masas puntuales m_1 y m_2 correspondientes a nuestro robot de dos segmentos. La aceleración a_1 de m_1 es

$$a_1 = \ddot{r}_1 = -\dot{\theta}_1^2 r_1 + \ddot{\theta}_1 (k \times r_1). \quad (5.41)$$

La aceleración a_2 de m_2 es

$$\begin{aligned} a_2 &= \ddot{r} = 2\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2 = \\ &= -2\ddot{\theta}_1^2 r_1 + 2\ddot{\theta}_1(k \times r_1) - (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)^2 r_2 + (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)(k \times r_2). \end{aligned} \quad (5.42)$$

De estas aceleraciones obtenemos las fuerzas totales que actúan sobre las partículas m_1 y m_2

$$F_1 = m_1 a_1 \text{ y } F_2 = m_2 a_2. \quad (5.43)$$

Ahora podemos calcular los pares de estas fuerzas con respecto al origen del marco de coordenadas

$$\tau_1 \times F_1 = r_1 \times m_1 a_1 \text{ y } \tau_2 = r \times F_2 = (2r_1 + r_2) \times m_2 a_2. \quad (5.44) \quad \tau_1$$

Insertando expresiones para a_1 y a_2 como se derivó anteriormente, recordándonos el doble producto vectorial [$a \times (b \times c) = b(a \cdot c) - c(a \cdot b)$], y haciendo con paciencia el álgebra larga, obtenemos obtener

$$\begin{aligned} \tau_1 &= m_1 r_1 \ddot{\theta}_1 \hat{k} \\ &\text{y} \\ \tau_2 &= [-1(4m_2 r_1^2 \ddot{\theta}_1 + 4m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2 + m_2 r_2^2 \ddot{\theta}_2) + \\ &\quad + \ddot{\theta}_1 (2m_2 r_1^2 + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) - \\ &\quad - \ddot{\theta}_1 \ddot{\theta}_2 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2 - \ddot{\theta}_2^2 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2] \hat{k}. \end{aligned} \quad (5.45)$$

La suma de ambos torques en las dos "partículas" de nuestro sistema es obviamente $\tau = \tau_1 + \tau_2$.

Por otro lado, podemos considerar nuestro sistema de dos segmentos que consta de dos masas puntuales y dos barras sin masa desde un punto de vista diferente. Como consecuencia de la tercera ley de Newton (Para cada acción hay una reacción igual pero opuesta), tenemos un teorema que establece que los pares internos en un sistema se anulan, por lo que solo los pares de fuerzas externas son relevantes. Los pares de las fuerzas externas en nuestro sistema de robot son los pares de la gravedad y el par ejercido por la base sobre la que se apoya el robot. El par de la base es igual al par M_1 del actuador en la primera junta. La suma de estos pares de fuerzas externas (base + gravedad) debe ser igual a $\tau_1 + \tau_2$ (derivado arriba), ya que ambos resultados representan dos formas de ver el par total en el mismo sistema. Entonces

$$M_1 + r_1 \times m_1 g + r \times m_2 g = \tau_1 + \tau_2. \quad (5.46)$$

Con $r = 2r_1 + r_2$ tenemos el par del actuador en la primera junta

$$M_1 = \tau_1 + \tau_2 - r_1 \times m_1 g - (2r_1 + r_2) \times m_2 g. \quad (5.47)$$

Recordando que g apunta verticalmente hacia abajo (es decir, a lo largo de $-y$) e insertando los resultados anteriores para τ_1 y τ_2 , finalmente obtenemos

$$\begin{aligned}
 M1 = & \ddot{\theta}_1 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + 4m_2 r_1^2 + 4m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) + \\
 & + \ddot{\theta}_2 (2m_2 r_2^2 + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) - \\
 & - \dot{\theta}_1^2 (24m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2 - 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2) + \\
 & + m_1 g r_1 \cos \theta_1 + 2m_2 g r_1 \cos \theta_1 + m_2 g r_2 \cos(\theta_1 + \theta_2).
 \end{aligned} \tag{5.48}$$

Para obtener el par M_2 del actuador en la segunda junta, primero consideraremos la fuerza total F_2 que actúa sobre la masa puntual m_2 . La fuerza F_2 es una suma de dos contribuciones. Una es la fuerza de gravedad $m_2 g$, la otra es la fuerza F ejercida sobre m_2 por la barra rígida y sin masa del segundo segmento. Entonces

$$F_2 = F_2' + m_2 g. \tag{5.49}$$

A esta ecuación le aplicamos un producto vectorial de r_2 por la izquierda y obtenemos

$$r_2 \times F_2 = r_2 \times F_2' + r_2 \times m_2 g. \tag{5.50}$$

El primer término del lado derecho es el producto vectorial de r_2 con la fuerza F_2' ejercida sobre m_2 por la barra rígida y sin masa. Este término es igual al par M_2 del actuador en la segunda junta. (Observe que la barra también puede ejercer una fuerza sobre m_2 dirigida a lo largo de la barra, pero el producto vectorial de esa componente con r_2 se anula). Obtenemos por tanto

$$M_2 = r_2 \times F_2 - r_2 \times m_2 g. \tag{5.51}$$

Sustituyendo $m_2 a_2$ por F_2 y la expresión deducida previamente por a_2 , se obtiene

$$\begin{aligned}
 M_2 = & \ddot{\theta}_1 (m_2 r_2^2 + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) + \ddot{\theta}_2 (2m_2 r_2^2 \\
 & + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) + m_2 g r_2 \cos(\theta_1 + \theta_2).
 \end{aligned} \tag{5.52}$$

Las expresiones para M_1 (5.48) y M_2 (5.52) parecen relativamente complicadas, así que investiguemos algunos casos simples y familiares. Primero, suponga $\theta_1 = -90^\circ$ y ningún par en la segunda junta $M_2 = 0$ (Fig. 5.14 izquierda). La ecuación para M_2 se reduce a

$$\ddot{\theta}_2 2m_2 r_2^2 = -m_2 g r_2 \sin \theta_2. \tag{5.53}$$

Esta es la ecuación de un péndulo simple con masa m_2 , momento de inercia $m_2 r_2^2$, que gira $\theta_2 =$ alrededor de la segunda articulación con aceleración angular $\ddot{\theta}_2$ (Fig. 5.14 izquierda). El lado izquierdo es entonces $J_2 \alpha_2$ y en el lado derecho tenemos el torque debido a la gravedad. Entonces, este es un ejemplo de la ecuación simple $M = J\alpha$, a la cual nuestro

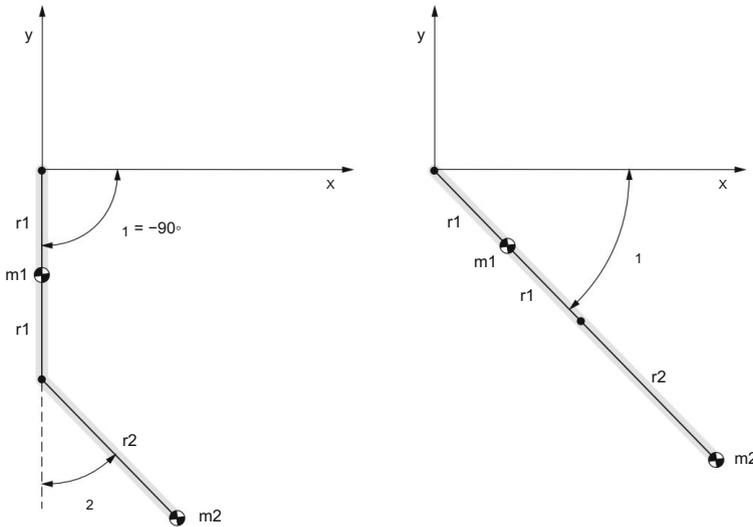


Fig. 5.14 Dos ejemplos simples del manipulador de robot de dos segmentos: $\theta_1 = -90^\circ$ (izquierda) y $\theta_2 = 0^\circ$ (derecha)

Se ha reducido la expresión complicada. Para oscilaciones pequeñas ($\theta_2 \approx \theta_1$) tenemos $\sin \theta_2 \approx \theta_2$ y la ecuación se convierte en

$$m_1 r_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 r_2^2 \ddot{\theta}_1 + 4m_2 r_1 r_2 \ddot{\theta}_1 = 0 \tag{5.54}$$

Esta es la ecuación del péndulo simple con frecuencia angular $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{r_1}}$

período de oscilación $T = 2\pi \sqrt{\frac{r_1}{g}}$

continuación, suponga que $\theta_2 = 0$, por lo que tenemos una barra rígida que gira alrededor de un extremo, que está fija en el origen del marco de coordenadas (Fig. 5.14 derecha). Si también "apagamos" la gravedad ($g = 0$), obtenemos para el par en la primera articulación

$$\begin{aligned} M_1 &= \ddot{\theta}_1 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + 4m_2 r_1 r_2) = \\ &= \ddot{\theta}_1 [m_1 r_1^2 + m_2 (2r_1 + r_2)^2] = J_{12} \alpha_1, \end{aligned} \tag{5.55}$$

donde $\alpha_1 = \ddot{\theta}_1$ es la aceleración angular y J_{12} es el momento de inercia combinado de las dos masas. Alternativamente, uno podría tomar el par en la primera articulación igual a cero, incluir la gravedad y obtener un péndulo relativamente simple con dos masas puntuales en una barra rígida sin masa.

Mencionemos que las ecuaciones completas anteriores para M_1 y M_2 (ecuaciones (5.48) y (5.52)), con adaptaciones menores de notación, son válidas para un péndulo doble con

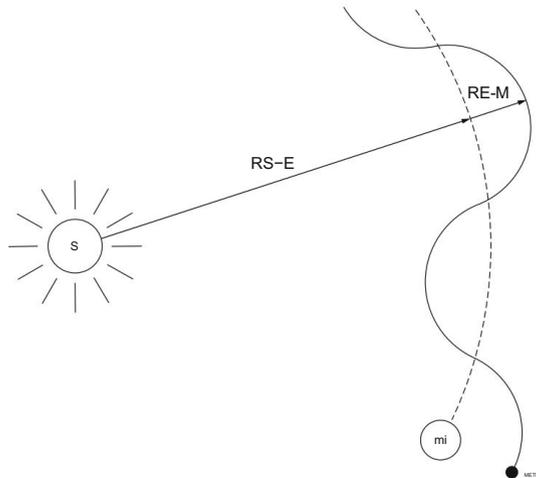


Fig. 5.15 Trayectoria esquemática (no a escala) de la Tierra (curva discontinua) y la Luna (curva completa) en el marco de referencia del Sol

fricción. Los pares de los actuadores se reemplazan en este caso por los pares de fricción en las articulaciones.

Un ejercicio divertido sería comparar las trayectorias de los extremos de los dos segmentos de nuestro robot simple con las trayectorias de la Tierra y la Luna, vistas desde el marco de referencia del Sol. Aproximemos la Tierra y la Luna como partículas puntuales (m_E y m_M) en órbitas circulares coplanarias. Como la fuerza gravitatoria actúa sólo a lo largo de la línea que une las dos partículas, no puede transmitir momentos de torsión, por lo que las aceleraciones angulares son cero y las velocidades angulares son constantes. La velocidad orbital de la Tierra alrededor del Sol ($RS-E \approx 150 \cdot 10^6$ km, $T = 365$ días, $v_E \approx 2,6 \cdot 10^6$ km/día) es mucho mayor que la velocidad orbital de la Luna alrededor de la Tierra ($RE-M \approx 0,38 \cdot 10^6$ km, $T = 28$ días, $v_M \approx 0,08 \cdot 10^6$ km/día), por lo que la trayectoria de la Luna vista en el marco de referencia del Sol sería aproximadamente una curva sinusoidal superpuesta a la órbita circular de la Tierra alrededor del Sol (figura 5.15).

Con nuestro robot de dos segmentos, uno podría tener velocidades angulares más altas del segundo segmento, lo que daría como resultado diferentes formas de la trayectoria de su punto final (los epiciclos de Ptolomeo, por ejemplo).

Volviendo a nuestras ecuaciones relativamente complicadas para los pares $M1$ y $M2$ (ecuaciones (5.48) y (5.52)), debido a los actuadores en las articulaciones, vemos que estas ecuaciones se pueden condensar en forma de matriz que representa el modelo dinámico del robot como

$$\tau = B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q). \quad (5.56)$$

En esta ecuación el vector τ une los pares de ambos actuadores

$$\tau = \begin{bmatrix} M1 \\ M2 \end{bmatrix} \cdot \quad (5.57)$$

Los vectores q , q' y q'' pertenecen a los segmentos trayectorias, velocidades y aceleraciones respectivamente. Para el robot de dos segmentos tenemos

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}, \quad q' = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}, \quad q'' = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix}.$$

El primer término de la ecuación para τ se llama término inercial. En nuestro caso del robot manipulador planar de dos segmentos con $r_1 = r_2 = l$ y simplificando la notación con $s_1 = \sin$, $c_{12} = \cos(q_1 + q_2)$ etc., obtenemos

$$B(q) = \begin{bmatrix} \frac{1}{4m_1l^2} + \frac{5}{4m_2l^2} + m_2l^2 c_2^2 & \frac{1}{4m_2l^2} + \frac{1}{2m_2l^2} c_2^2 \\ \frac{1}{4m_2l^2} + \frac{1}{2m_2l^2} c_2^2 & \frac{1}{4m_2l^2} + \frac{1}{2m_2l^2} c_2^2 \end{bmatrix}. \quad (5.58)$$

El segundo término de esta ecuación matricial se denomina término de Coriolis e incluye efectos de velocidad y centrífugos. Para el robot de dos segmentos tenemos la siguiente matriz

$$C(q, q') = \begin{bmatrix} -m_2l^2 \dot{q}_2 s_2 & -\frac{1}{2} m_2l^2 \dot{q}_2^2 \\ \frac{1}{2} m_2l^2 s_2^2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.59)$$

La columna gravitacional $g(q)$ tiene en nuestro caso la siguiente forma

$$g(q) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} m_1 g l c_1 + m_2 g l c_1 \\ \frac{1}{2} m_2 g l c_{12} \end{bmatrix}. \quad (5.60)$$

Capítulo 6

Robots paralelos



Este capítulo trata sobre los robots cada vez más populares y de alto rendimiento que se conocen como robots paralelos. Los mecanismos estándar de los robots industriales poseen cadenas cinemáticas en serie en las que se alternan eslabones y uniones, como se muestra en la Fig. 6.1 (izquierda). Estos se conocen como robots en serie. Últimamente, hemos visto un avance significativo de los robots paralelos. Incluyen cadenas cinemáticas cerradas, un ejemplo se muestra en la Fig. 6.1 (derecha).

En la industria, los robots paralelos han comenzado a ganar terreno en las últimas dos décadas. Sin embargo, los desarrollos iniciales se remontan a 1962 cuando Gough y Whitehall desarrollaron un robot paralelo para probar neumáticos de automóviles. Casi al mismo tiempo, Stewart introdujo un robot paralelo similar para diseñar un simulador de vuelo. El robot paralelo, en el que una plataforma móvil está controlada por seis patas accionadas, se denomina plataforma de Stewart-Gough. El avance de los robots paralelos también se debió en gran medida al robot desarrollado por Clavel en los años ochenta. Su mecanismo fue patentado en USA en 1990 bajo el nombre de robot Delta. Los mecanismos paralelos en robótica se habían convertido en un tema de investigación científica sistemática a principios de los años ochenta. Estas actividades se intensificaron significativamente en los años noventa y culminaron con algunos logros clave en la cinemática de robots en general.

6.1 Características de los Robots Paralelos

En los robots en serie, el número de grados de libertad es idéntico al número total de grados de libertad en las articulaciones. Por lo tanto, todas las juntas deben ser accionadas y, por lo general, solo se utilizan juntas simples de traslación y rotación de un grado de libertad. En los robots paralelos, el número de grados de libertad es menor que el número total de grados de libertad en las articulaciones, por lo que muchas articulaciones son pasivas. Las articulaciones pasivas pueden ser más complejas; Los representantes típicos son la junta universal y la junta esférica. La junta universal consta de dos rotaciones perpendiculares, mientras que tres

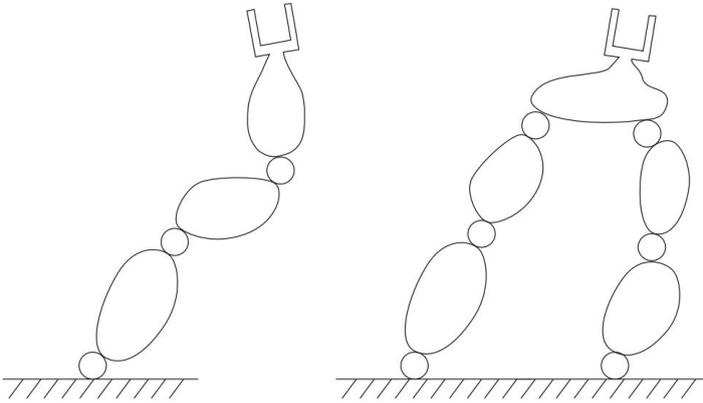


Fig. 6.1 Cadena cinemática en serie (izquierda) y cadena cinemática cerrada (derecha)

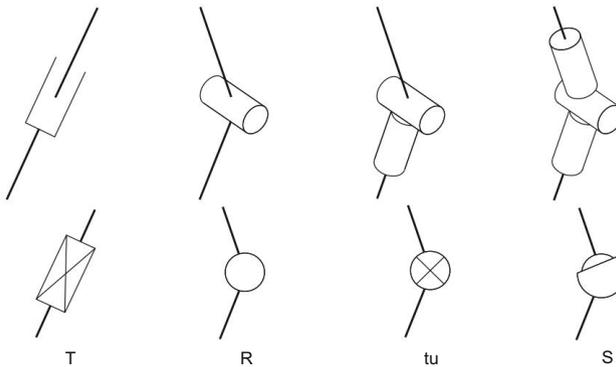


Fig. 6.2 Tipos de juntas que se utilizan a menudo en mecanismos paralelos

rotaciones componen la articulación esférica como se muestra en la Fig. 6.2. Aquí, las letras T, R, U y S se utilizan para marcar la junta de traslación, la junta de rotación, la junta universal y la junta esférica, respectivamente.

En los robots paralelos, el último eslabón (superior) de los mecanismos es la llamada plataforma (Fig. 6.3). La plataforma es el eslabón activo al que se une el efector final. Está conectado a la base fija por un número determinado de (generalmente) mecanismos en serie llamados patas. Toda la estructura contiene al menos una cadena cinemática cerrada (mínimo dos patas). Los desplazamientos en las patas producen un desplazamiento de la plataforma como se muestra en la Fig. 6.3. Los movimientos de la plataforma y las patas están conectados por expresiones trigonométricas a menudo muy complejas (cinemática directa e inversa) según la geometría del mecanismo, el tipo de articulaciones, el número de patas y sus arreglos cinemáticos.

Desafortunadamente, no existen denominaciones únicas y uniformes para robots paralelos. En este trabajo, un robot paralelo se denomina por el tipo de cadenas cinemáticas que representa.

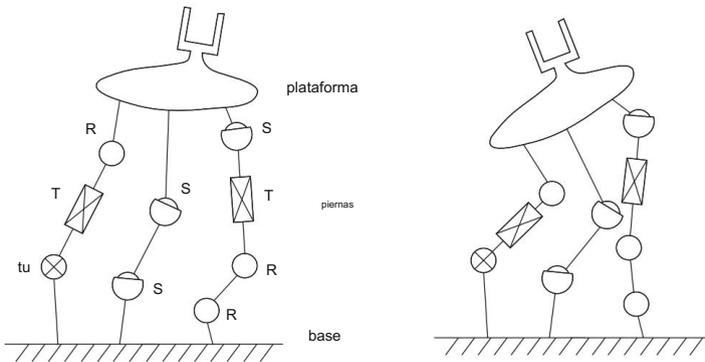


Fig. 6.3 Estructura básica de un robot paralelo

enviando las piernas. Así, el robot de la Fig. 6.3 se denomina UTR-SS-RRTS. Cuando se repiten patas del mismo tipo, por ejemplo, en el robot TRR-TRR-TRR, la denominación se puede simplificar como 3TRR.

Número de grados de libertad

Cada articulación contribuye a la movilidad del robot introduciendo un número determinado de grados de libertad o, alternativamente, introduciendo un número correspondiente de restricciones, que se definen a continuación. Sea λ el número máximo de grados de libertad de un cuerpo en movimiento libre (en el espacio $\lambda = 6$ y en el plano $\lambda = 3$), y sea f_i el número de grados de libertad de la i -ésima articulación. El número correspondiente de restricciones es

$$c_i = \lambda - f_i. \quad (6.1)$$

En la práctica robótica donde dominan los robots en serie, generalmente consideramos las articulaciones como elementos que agregan grados de libertad al movimiento del efector final del robot. En los robots paralelos, por el contrario, es más ventajoso considerar el movimiento de la plataforma (a la que se une el efector final), teniendo en cuenta el número de restricciones introducidas por las articulaciones. Por lo tanto, una junta universal U en un espacio donde $\lambda = 6$ introduce $f_i = 2$ grados de libertad y $c_i = \lambda - f_i = 6 - 2 = 4$ restricciones.

O, por ejemplo, en un plano donde $\lambda = 3$, una articulación rotacional R introduce $f_i = 1$ grados de libertad y $c_i = \lambda - f_i = 3 - 1 = 2$ restricciones, mientras que la misma articulación en el espacio introduce $c_i = \lambda - f_i = 6 - 1 = 5$ restricciones. Tenga en cuenta que las juntas de rotación y traslación pueden operar tanto en un plano como en el espacio, mientras que las juntas esféricas y universales solo producen movimientos espaciales y no se pueden usar en robots planos.

El número de grados de libertad de un robot paralelo es menor que el número total de grados de libertad aportados por las articulaciones del robot, a diferencia de un robot en serie donde estos dos números son idénticos. Sea N el número de eslabones móviles del robot y n el número de articulaciones. Las articulaciones se denominan $i = 1, 2, \dots, n$. Cada articulación posee f_i grados de libertad y restricciones c_i . Los N enlaces de movimiento libre poseen $N\lambda$ grados de libertad. Cuando se combinan en un mecanismo, su movimiento

está limitada por las restricciones introducidas por las articulaciones, por lo que el número de grados de libertad de un mecanismo de robot es

$$F = N\lambda - \sum_{y=0}^{n-1} c_i \quad (6.2)$$

Aquí, sustituyendo c_i por $\lambda - f_i$ obtenemos la conocida fórmula de Grübler de la siguiente manera

$$F = \lambda(N - n) + \sum_{y=0}^{n-1} f_i \quad (6.3)$$

No debemos olvidar que el número de motores que controlan el movimiento de un robot es igual a F .

Tenga en cuenta que en los robots en serie, el número de enlaces móviles y el número de articulaciones son idénticos ($N = n$), por lo que la primera parte de la fórmula de Grübler siempre es cero ($\lambda(N - n) = 0$). Esto explica por qué el número de grados de libertad en los robots en serie es simplemente

$$F = \sum_{y=0}^{n-1} f_i \quad (6.4)$$

Una forma muy práctica de la fórmula de Grübler para calcular los grados de libertad de un robot paralelo se puede obtener de la siguiente manera. Suponga que un mecanismo paralelo incluye $k = 1, 2, \dots, K$ patas, y que cada una de las patas posee v_k grados de libertad y, en consecuencia, $\xi_k = \lambda - v_k$ restricciones. Cuando la plataforma no está conectada a las piernas y puede moverse libremente en el espacio, contiene λ grados de libertad. El número de grados de libertad de una plataforma conectada se puede calcular restando la suma de las restricciones introducidas por las piernas

$$F = \lambda - \sum_{k=1}^K \xi_k \quad (6.5)$$

Las ecuaciones (6.3) y (6.5) son matemáticamente idénticas y pueden transformarse de una a otra mediante operaciones algebraicas simples.

Ahora podemos calcular los grados de libertad del robot que se muestra en la figura 6.3. Este robot posee $N = 7$ enlaces móviles y $n = 9$ articulaciones. El número total de grados de libertad en las articulaciones es de 16 (3 articulaciones de rotación, 2 articulaciones de traslación, 1 articulación universal y 3 articulaciones esféricas). Usando la fórmula estándar de Grübler dada en la ecuación (6.3), obtenemos

$$F = 6(7 - 9) + 16 = 4.$$

Si ahora usamos la forma modificada de la fórmula de Grübler, necesitamos calcular las restricciones introducidas por cada pierna. Esto es bastante simple porque solo necesitamos restar el número de grados de libertad de cada cateto de λ . Para el robot dado (piernas

se cuentan de izquierda a derecha) tenemos $\xi_1 = 2$, $\xi_2 = 0$ y $\xi_3 = 0$. Introduciendo estos valores en la Ec. (6.5), como era de esperar, obtenemos

$$F = 6 - 2 = 4.$$

Ventajas y desventajas de los robots paralelos

La introducción de robots paralelos en la industria está motivada por la cantidad de ventajas significativas que tienen los robots paralelos en comparación con los robots en serie. Los más evidentes son los siguientes:

Capacidad de carga, rigidez y precisión. La capacidad de carga de los robots paralelos es considerablemente mayor que la de los robots en serie. Los robots paralelos también son más rígidos y su precisión en el posicionamiento y la orientación de un efector final es varias veces mejor que la de los robots en serie.

Excelentes propiedades dinámicas. La plataforma puede alcanzar altas velocidades y aceleraciones. Además, la frecuencia de resonancia de un robot paralelo es mucho mayor.

Construcción sencilla. Varias juntas pasivas en robots paralelos permiten una construcción mecánica sencilla y menos costosa. Cuando se construyen robots paralelos, se pueden usar rodamientos estándar, husillos y otros elementos de la máquina.

El uso de robots paralelos es, sin embargo, limitado. Debido a las piernas enredadas, los robots paralelos pueden tener dificultades para evitar obstáculos en su espacio de trabajo. Otras desventajas significativas son:

Pequeño espacio de trabajo. Los robots paralelos tienen espacios de trabajo considerablemente más pequeños que los robots en serie de tamaño comparable. Su espacio de trabajo puede reducirse aún más ya que durante el movimiento de la plataforma las patas pueden interferir entre sí.

Cinemática compleja. El cálculo de la cinemática de robots paralelos es complejo y largo. A diferencia de los robots en serie, donde la dificultad surge al resolver el problema de cinemática inversa, en los mecanismos paralelos la dificultad surge al resolver el problema de cinemática directa.

Singularidades cinemáticas fatales. Los robots en serie en poses cinemáticamente singulares pierden movilidad. Los robots paralelos en poses singulares ganan grados de libertad, que no se pueden controlar. Esta es una situación fatal porque no se puede resolver.

6.2 Arreglos Cinemáticos de Robots Paralelos

Podemos crear una inmensa cantidad de arreglos cinemáticos de robots paralelos.

En la práctica industrial, sin embargo, sólo se utilizan unos pocos de estos. La más popular y general en el sentido cinemático es la plataforma de Stewart-Gough, como se muestra en la figura 6.4.

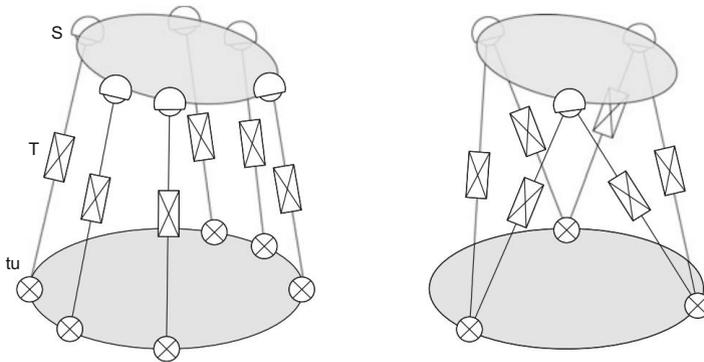


Fig. 6.4 La plataforma de Stewart-Gough

Plataforma Stewart-Gough

En el lado izquierdo de la figura 6.4 se muestra una plataforma general de Stewart-Gough. Según nuestra denominación, el mecanismo es de tipo 6UTS. El robot contiene $n = 18$ articulaciones, $N = 13$ enlaces móviles y la suma de $f_i, i = 1, 2, \dots, n$ es 36. Esto da el resultado esperado

$$F = 6(13 - 18) + 36 = 6$$

grados de libertad. La plataforma de este robot se puede posicionar y orientar espacialmente bajo el control de seis motores, que suelen ser las seis traslaciones. Al acortar o expandir las piernas (cambiando la longitud de las piernas), la plataforma se puede mover a la posición deseada (posición y orientación). Una ventaja especial de la plataforma Stewart Gough con patas UTS es que las cargas que actúan sobre la plataforma se transfieren a cada pata en particular en forma de fuerza longitudinal en la dirección de la pata y no hay carga transversal en las patas. Esta peculiaridad permite excelentes prestaciones dinámicas.

El número de grados de libertad de un tramo UTS es seis y el número de restricciones es cero. Si consideramos la fórmula de Grübler (6.5) es fácil comprobar que el número de patas UTS no afecta al número de grados de libertad del robot y que la movilidad de la plataforma de Stewart-Gough no depende del número de patas.

Un robot con una sola pata UTS, que es un robot en serie, posee seis grados de libertad, lo mismo que el robot Stewart-Gough original de seis patas completamente paralelo.

El mecanismo de seis patas en el lado derecho de la figura 6.4 representa esquemáticamente la plataforma original de Stewart-Gough que tiene una forma de estrella simétrica central. En esta disposición, las patas de dos por dos se sujetan en un punto en el que se colocan dos juntas esféricas (o universales) coincidentes superpuestas. Por tanto, el número de juntas esféricas independientes es seis y el mismo número de juntas universales.

Las uniones superpuestas no solo simplifican la construcción, sino que también permiten cálculos más sencillos de la cinemática y la dinámica del robot.

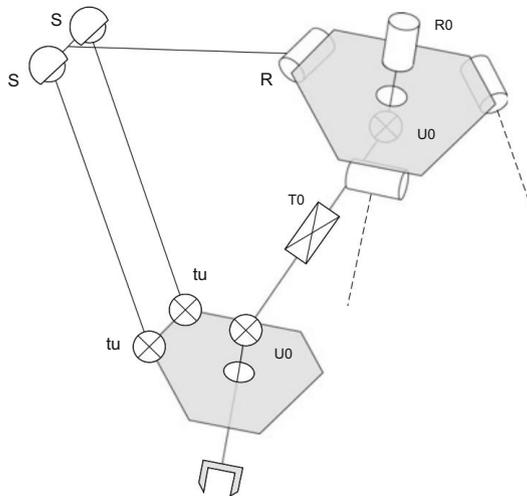


Fig. 6.5 El robot Delta

robot delta

Debido a sus características de movimiento específicas y sus numerosas aplicaciones en la industria, el robot Delta encontró su lugar entre los fabricantes de robots (ver Fig. 6.5). La cinemática de este robot es muy sofisticada. El principal objetivo de su creador era crear un robot ligero con actuaciones dinámicas extremas.

La base fija del robot es el hexágono superior mientras que el hexágono inferior representa la plataforma móvil. El robot tiene tres patas laterales. En la figura se presenta uno solo, con una junta en R, dos juntas en S y dos juntas en U; las otras dos patas se dibujan simbólicamente con una línea de puntos. También hay una pata central independiente R0U0T0U0 que no influye en el movimiento de la plataforma. Existe un mecanismo de gramo paralelo entre la mitad de la pata y la base, que consta de dos juntas esféricas S y dos juntas universales U. Cada pata, por lo tanto, tiene 3 enlaces y 5 articulaciones. Sin considerar el lado medio, el número de grados de libertad del mecanismo es

$$F = 6(10 - 15) + 33 = 3.$$

La pose de la plataforma está determinada por solo tres variables. En la versión original del robot Delta, los tres ángulos de rotación R en las patas laterales están controlados por motores. Debido a la estructura de paralelogramo de las patas, la plataforma ejecuta solo traslación y siempre es paralela a la base.

El propósito de la pata del medio es transferir la rotación R0 a través de la plataforma a la pinza en el punto final del robot. Actúa como un eje de transmisión telescópico para girar la pinza. Esta pata es una junta cardán con dos juntas universales U0 separadas por una junta de translación T0. En total, el mecanismo tiene cuatro grados de libertad: tres traslacionales, que permiten la posición espacial de la pinza y uno rotacional, que permite

rotación de la pinza alrededor de un eje perpendicular a la plataforma. Todos los actuadores del mecanismo Delta están unidos a la base y no se mueven. Por lo tanto, el mecanismo es extremadamente liviano y la plataforma puede moverse con altas velocidades y aceleraciones.

Robots planos paralelos

Los siguientes ejemplos son robots planos paralelos que operan en un plano dado donde $\lambda = 3$. El primer ejemplo se muestra en la Fig. 6.6 a la izquierda. El robot contiene tres patas del tipo RTR-RRR-RRR. Como resultado tenemos $N = 7$ y $n = 9$ y el número total de grados de libertad en los nudos es 9. De acuerdo con la Ec. (6.3), el número de grados de libertad de este robot es

$$F = 3(7 - 9) + 9 = 3.$$

El resultado es el esperado ya que todos los tramos introducen restricciones cero (6.5). En consecuencia, la plataforma puede lograr cualquier pose deseada dentro del espacio de trabajo. Tenga en cuenta que en el plano se necesitan dos grados de libertad para la posición (traslaciones en el plano $x-y$) y un grado de libertad para la orientación (una rotación sobre el eje z). Para activar este robot se necesitan tres motores. Para acoplar los motores, podemos seleccionar cualquiera de las nueve articulaciones. Normalmente preferimos las articulaciones unidas a la base para que los motores no se muevan y su peso no influya en la dinámica del robot. En un caso específico, la junta de traslación también se puede motorizar mediante un husillo eléctrico o un cilindro hidráulico.

En la Fig. 6.6 derecha se presenta un robot plano paralelo similar, su estructura es RTR RR-RR. Aquí, podemos ver que cada uno de los dos tramos de RR introduce una restricción. De acuerdo con la Ec. (6.5), el número de grados de libertad de este robot paralelo es

$$F = 3 - 2 = 1.$$

El robot se controla mediante un motor. La plataforma tiene movilidad limitada y solo puede moverse a lo largo de una curva en el plano $x-y$. Podemos, por ejemplo, posicionar el

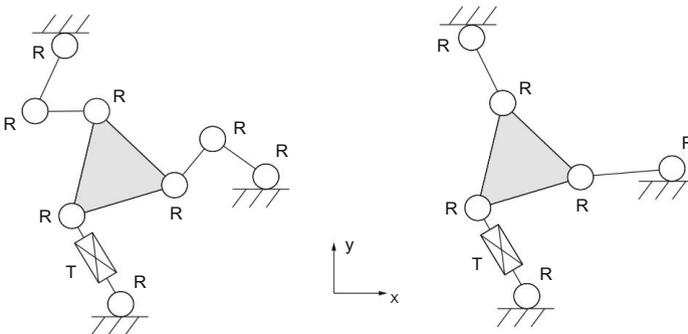


Fig. 6.6 Robots planos paralelos

plataforma a lo largo del eje x sin tener control sobre y y la orientación de la plataforma o, alternativamente, orientar la plataforma sin tener control sobre su posición en x e y.

Hombro humanoide paralelo

Los mecanismos paralelos son muy comunes en la naturaleza, en el cuerpo humano o en los animales. Por lo tanto, no sorprende que los modelos de robots paralelos se puedan usar de manera eficiente para simular propiedades biomecánicas de humanos donde los músculos y ligamentos estirados sobre las articulaciones forman varias estructuras cinemáticas paralelas. Por ejemplo, el complejo del hombro se puede representar mediante dos composiciones básicas, la denominada articulación interna, que incluye el movimiento de la clavícula y la escápula con respecto al tronco, y la denominada articulación externa, que está asociada con el articulación glenohumeral. En la robótica humanoide actual, el movimiento de la articulación interna generalmente se descuida debido a su complejidad mecánica. Sin embargo, su contribución al movimiento humano, la capacidad de alcance del brazo y la dinámica es crucial.

En la literatura se propuso un mecanismo de hombro paralelo que representa el hombro interno. Su movimiento se muestra en la Fig. 6.7. La estructura propuesta es TS-3UTS.

Hay un lado central T0S0 con cuatro grados de libertad y dos restricciones. Alrededor del eje de la pata central se unen tres patas laterales UTS que poseen seis grados de libertad cada una, su número de restricciones es cero. De acuerdo con la Ec. (6.5), el número de grados de libertad del robot es

$$F = 6 - 2 = 4.$$

El robot puede producir una orientación completa de la plataforma (alrededor de tres ángulos de orientación principales) y puede expandirse o encogerse de manera similar al hombro humano. El brazo se une a esta plataforma a través de la articulación glenohumeral. Las articulaciones internas del hombro, como se propone, imitan con precisión el movimiento del brazo, incluido el encogimiento de hombros.

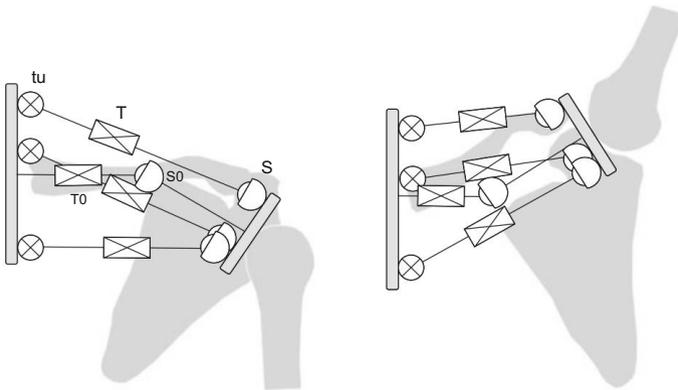


Fig. 6.7 Robot paralelo que imita el mecanismo del hombro interno

y evitando colisiones con el cuerpo, y proporciona una excelente capacidad de carga estática y capacidades dinámicas.

6.3 Modelado y Diseño de Robots Paralelos

La mayoría de los robots paralelos que aparecen en la industria o en los laboratorios de investigación poseen disposiciones cinemáticas simétricas. Desde el punto de vista de su construcción, es útil que estén compuestos por los mismos elementos mecánicos.

La simetría también contribuye a simplificar su tratamiento matemático.

Un grupo común de arreglos cinemáticos está representado por el robot de hombro descrito anteriormente. Este grupo contiene una pata central con v_1 grados de libertad alrededor de la cual hay patas laterales colocadas simétricamente, que a menudo son del tipo UTS que poseen $v_2, v_3, \dots, v_K = \lambda$ grados de libertad (y cero restricciones). Por lo tanto, la pata central es crucial para determinar las propiedades cinemáticas de todo el robot, ya que el número de grados de libertad del robot es $F = v_1$.

El segundo grupo de arreglos cinemáticos está representado por la plataforma de Stewart Gough en la que todas las patas son idénticas y suelen ser de tipo UTS de modo que $v_1, v_2, \dots, v_K = \lambda$. Cuando $v_1, v_2, \dots, v_K < \lambda$ solo un pequeño número de tales robots son móviles, la mayoría de sus estructuras tienen grados de libertad cero o negativos. Los robots con un número negativo de grados de libertad se denominan sobrerrestringidos.

Considere el segundo grupo de robots (estructura cinemática similar a Gough-Stewart) con un solo motor en cada pata. Tal robot debe tener $K = F$ piernas, ya que un robot con $K < F$ no puede ser controlado. Es fácil verificar que solo los siguientes robots pueden existir en el espacio (donde $\lambda = 6$)

$$\begin{aligned} K = 1, v_1 &= 1 \\ K = 2, v_1 = v_2 &= 4 \\ K = 3, v_1 = v_2 = v_3 &= 5 \\ K = 6, v_1 = v_2 = \dots = v_6 &= 6 \end{aligned}$$

Los robots de este grupo de cuatro y cinco patas no existen. En el plano, donde $\lambda = 3$, solo pueden existir los siguientes robots

$$\begin{aligned} K = 1, v_1 &= 1 \\ K = 3, v_1 = v_2 = v_3 &= 3 \end{aligned}$$

En el caso planar, no existen robots con dos piernas.

Parámetros cinemáticos y coordenadas de robots paralelos

En la figura 6.8, el marco de coordenadas $x-y-z$ está unido a la plataforma móvil, mientras que $x_0-y_0-z_0$ está fijo a la base. La posición de la plataforma está dada con respecto al marco de coordenadas fijo por el vector r ; sus componentes son r_x, r_y, r_z . La orientación

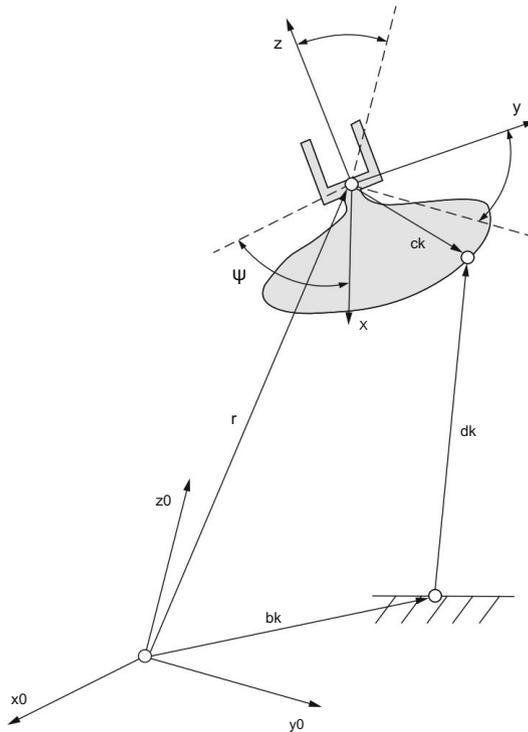


Fig. 6.8 Parámetros cinemáticos de un robot paralelo

de la plataforma se puede describir mediante un triplete elegido de ángulos de orientación ψ , θ , ϕ que ocurren entre ambos marcos de coordenadas (ver el Capítulo 4 para más detalles).

El vector b_k define la unión de la pata k a la base expresada en el marco x_0 - y_0 - z_0 , mientras que el vector c_k define la unión de la misma pata a la plataforma en el marco x - y - z . los vectores

$$r = R c_k - b_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad dk \quad (6.6)$$

describa la geometría de las patas del robot expresada en el marco de coordenadas x_0 - y_0 - z_0 . Aquí, $R = R(\psi, \theta, \phi)$ es la matriz de rotación de 3×3 que transforma el marco de coordenadas x - y - z en x_0 - y_0 - z_0 . La ecuación (6.6) también se puede formular en forma homogénea de la siguiente manera

$$dk = H c_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (6.7)$$

donde la matriz de transformación homogénea es

$$H = \begin{bmatrix} R & r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Suponemos que las longitudes de las piernas son las coordenadas conjuntas del robot.

$$q_k = d_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (6.9)$$

donde \cdot indica norma vectorial. Son elementos del vector de coordenadas articulares

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_K)^T.$$

Los parámetros cinemáticos del robot son los vectores b_k , $k = 1, 2, \dots, K$ expresados en el marco $x_0-y_0-z_0$ y los vectores c_k expresados en el marco $x-y-z$.

Una vez que hemos definido las coordenadas internas, veamos cuáles son las coordenadas externas del robot. En los robots paralelos, suelen representar algunas características en el movimiento de la plataforma a la que se une el efector final. En la mayoría de los casos, las coordenadas externas elegidas son la posición y orientación de la plataforma, las denominadas coordenadas cartesianas. En el espacio donde $\lambda = 6$ incluyen las tres componentes r_x, r_y, r_z del vector de posición de la Fig. 6.8, y los tres ángulos de orientación ψ, θ, ϕ , de modo que el vector de coordenadas externas se define como sigue

$$p_{\text{ags}} = (r_x, r_y, r_z, \psi, \theta, \phi)^T.$$

Cinemática inversa y directa de robots paralelos

Desde el punto de vista del control, la relación entre las coordenadas externas e internas es de suma importancia. Su relación está determinada, de manera similar a los robots en serie, por ecuaciones trigonométricas algebraicas muy complicadas.

El problema de cinemática inversa de los robots paralelos requiere determinar las coordenadas internas q , que son las longitudes de las piernas, a partir de un conjunto dado de coordenadas externas p , que representan la posición y orientación de la plataforma. Para un conjunto dado de coordenadas externas p , las coordenadas internas se pueden obtener simplemente resolviendo la ecuación. (6.7). Aquí, a diferencia de los robots en serie, es importante reconocer que los valores de las coordenadas externas definen de manera única las longitudes de las piernas del robot paralelo y el cálculo es sencillo.

El problema de cinemática directa de los robots paralelos requiere determinar las coordenadas externas p a partir de un conjunto dado de coordenadas articulares q (figura 6.9). Este problema es extremadamente complicado en términos matemáticos y los procedimientos de cálculo son engorrosos. En general, no es posible expresar las coordenadas externas como funciones explícitas de las coordenadas internas, mientras que con los robots en serie esto es bastante sencillo. Por lo general, se trata de ecuaciones trigonométricas y cuadráticas acopladas que pueden resolverse en forma cerrada solo en casos especiales. No existen reglas sobre cómo abordar las soluciones simbólicas. Las siguientes dificultades son comunes:

Inexistencia de una solución real. Para algunos valores de coordenadas internas no existen soluciones reales para las coordenadas externas. Los intervalos de coordenadas internas en los que esto puede suceder no se pueden prever de antemano.

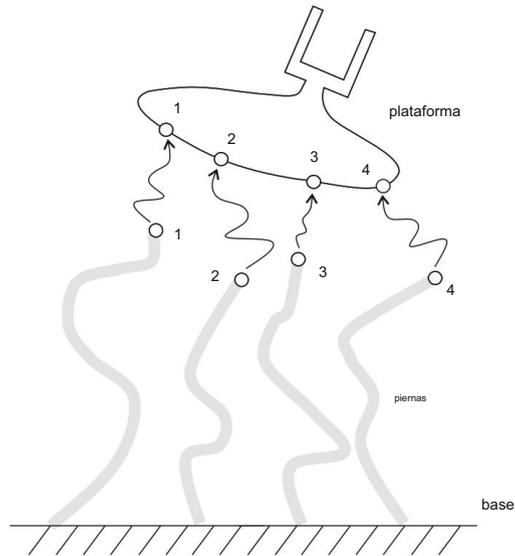


Fig. 6.9 El problema de cinemática directa consiste en encontrar la pose de la plataforma correspondiente a la longitud de las piernas. Los puntos finales de los tramos deben coincidir con los puntos correspondientes en la plataforma (p. ej., 1 – 1)

Múltiples soluciones. Para un conjunto dado de coordenadas internas, existen múltiples soluciones para las coordenadas externas. El número de soluciones para una combinación dada de longitudes de patas depende de la estructura cinemática del mecanismo. La plataforma general de Stewart-Gough tiene cuarenta soluciones posibles del problema de cinemática directa. Para una combinación seleccionada de longitudes de piernas, existen cuarenta poses diferentes de la plataforma. Además, a veces no se puede cambiar entre dos poses de la plataforma porque las piernas se enredan. En tales casos, la plataforma podría pasar de una pose a otra solo desmantelando las piernas en la primera pose y volviendo a ensamblarlas en la nueva pose.

Inexistencia de soluciones de forma cerrada. Generalmente, para un conjunto dado de coordenadas conjuntas, no es posible encontrar una solución exacta al problema de cinemática directa, incluso si existe una solución real. En tales casos usamos técnicas numéricas que no necesariamente convergen y pueden no encontrar todas las soluciones.

Diseño de robots paralelos

El diseño de los robots paralelos depende del rendimiento, la flexibilidad, la movilidad y la capacidad de carga deseados, así como del espacio de trabajo real.

Al considerar los espacios de trabajo para los robots paralelos y en serie, nos referimos al espacio de trabajo alcanzable y al espacio de trabajo diestro. Uno de los principales inconvenientes de los robots paralelos es su pequeño espacio de trabajo. El objetivo principal del análisis del espacio de trabajo es, por lo tanto, determinar si una trayectoria deseada se encuentra dentro del espacio de trabajo del robot. El tamaño del espacio de trabajo en robots paralelos está limitado por los rangos en los desplazamientos de

las piernas, desplazamientos de articulaciones pasivas y, en particular, por interferencia entre las piernas del robot. Incluso con pequeños movimientos, las piernas pueden chocar entre sí. El entrelazamiento de las piernas es en la práctica un obstáculo importante en el movimiento de un robot y su accesibilidad. La determinación y el análisis del espacio de trabajo del robot es, en general, un proceso tedioso. En los robots paralelos suele ser aún más complejo, dependiendo del número de grados de libertad y la arquitectura del mecanismo.

El efecto de la carga en los robots en serie suele verse en términos de dinámica, que en gran medida incluye la inercia de los enlaces. La contribución de una fuerza externa suele ser menor y, en muchos casos, puede despreciarse. En los robots paralelos con un gran número de patas, donde los eslabones son muy ligeros y los motores suelen estar unidos a la base fija, la estática del robot juega un papel importante. El cálculo de la estática del robot está relacionado con la conocida matriz jacobiana que representa la transformación entre las coordenadas externas e internas. Esto va más allá del alcance de nuestro libro, pero hay considerable literatura, artículos y libros de texto disponibles para el lector interesado.

En la práctica, a menudo podemos ver una plataforma de Stewart-Gough que tiene una estructura como la que se presenta en la figura 6.10. El robot contiene (en lugar de seis patas de tipo UTS) seis patas de tipo STS. Cinemáticamente, esta arquitectura es bastante inusual y redundante. El robot tiene demasiados grados de libertad. Cada pierna posee 7 grados de libertad.

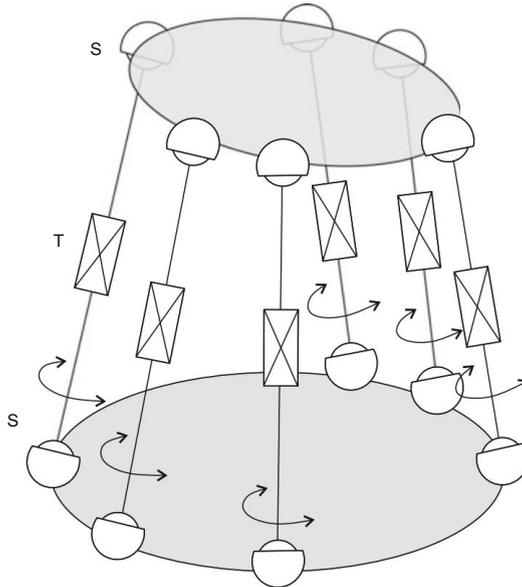


Fig. 6.10 Una modificación de la plataforma de Stewart-Gough

que corresponde a las restricciones -1 . Según la fórmula de Grübler (6.5), el número de grados de libertad del robot es

$$F = 6 - (-6) = 12.$$

Es importante señalar que seis de los doce grados de libertad se manifiestan como rotaciones de las piernas alrededor de sus propios ejes. Estas rotaciones no tienen influencia en el movimiento de la plataforma. Por lo tanto, el robot aún puede ser motorizado por solo seis motores que cambian la longitud de las piernas, afectando la traslación T , mientras que las rotaciones alrededor de los ejes de las piernas pueden dejarse pasivas y pueden cambiar libremente. Las ventajas de esta construcción son que los empalmes en S son más fáciles de construir que los empalmes en U (y, por lo tanto, más baratos), y que las rotaciones pasivas alrededor de los ejes de las patas permiten una mayor flexibilidad al conectar los cables de alimentación y de señal, ya que a menudo se disponen a lo largo de las patas desde la base a la plataforma del robot.

Capítulo 7

Sensores robóticos



El sistema sensorial humano abarca sensores de visión y oído, sensores cinestésicos (movimiento, fuerza y tacto), sensores de gusto y olfato. Estos sensores envían señales de entrada al cerebro, que utiliza esta información sensorial para construir su propia imagen del entorno y toma decisiones para acciones futuras. Requisitos similares también son válidos para mecanismos de robot. Sin embargo, debido a la complejidad de la detección humana, la detección robótica se limita a menos sensores.

El uso de sensores es de crucial importancia para el funcionamiento eficiente y preciso del robot. Los sensores del robot se pueden dividir generalmente en: (1) sensores propioceptivos que evalúan los estados internos del mecanismo del robot (posiciones, velocidades y pares en las articulaciones del robot); y (2) sensores exteroceptivos que entregan al controlador la información sobre el entorno del robot (sensores de fuerza, táctiles, de proximidad y distancia, visión del robot).

7.1 Principios de detección

En general, los sensores convierten la variable física medida en una señal eléctrica que puede ser evaluada en forma digital por la computadora. En robótica estamos predominantemente interesados en las siguientes variables: posición, velocidad, fuerza y torque. Mediante el uso de transductores especiales, estas variables se pueden convertir en señales eléctricas, como voltaje, corriente, resistencia, capacidad o inductividad. Según el principio de conversión, los sensores se pueden dividir de la siguiente manera:

- Sensores eléctricos: la variable física se transforma directamente en una señal eléctrica; dichos sensores son, por ejemplo, potenciómetros o galgas extensométricas;
- Sensores electromagnéticos: utilizan el campo magnético con fines de variación física. conversión capaz; un ejemplo es el tacómetro;

- Sensores ópticos: usan luz al convertir las señales; un ejemplo de tal El sensor es el codificador óptico.

7.2 Sensores de Movimiento

Los sensores típicos de los movimientos de los robots son potenciómetros, codificadores ópticos y tacómetros. Todos miden los movimientos del robot dentro de la articulación del robot. Es importante dónde colocar el sensor de movimiento en la articulación, así como también cómo medir los parámetros de movimiento.

7.2.1 Colocación de sensores

Consideremos primero un sensor de desplazamiento angular. Nuestro objetivo es medir el ángulo en una articulación de robot que es accionada por un motor a través de un reductor con la relación de reducción k_r . Mediante un reductor disminuimos la velocidad angular articular en el factor k_r con respecto a la velocidad angular del motor. Al mismo tiempo, el par de torsión de la articulación aumenta en el mismo factor. Es importante si el sensor de movimiento se coloca antes o después del reductor. La elección depende de los requisitos de la tarea y del sensor utilizado. En un caso ideal montamos el sensor antes del reductor (en el lado del motor), como se muestra en la Fig. 7.1. De esta manera medimos directamente las rotaciones del motor. A continuación, la salida del sensor debe dividirse por la relación de reducción para obtener el ángulo de unión.

Denotemos por θ la posición angular de la junta, m como la posición angular del motor correspondiente y k_r la relación de reducción del reductor. Cuando el sensor

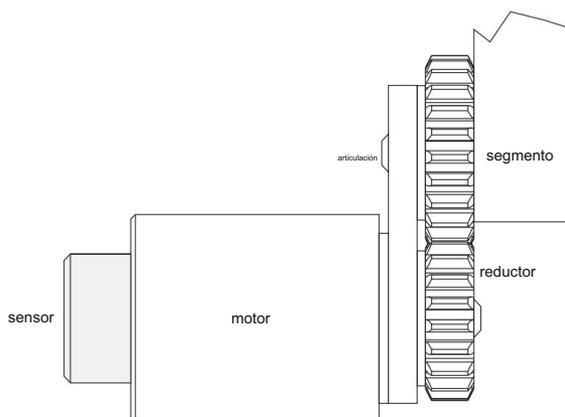


Fig. 7.1 Montaje del sensor de movimiento antes del reductor

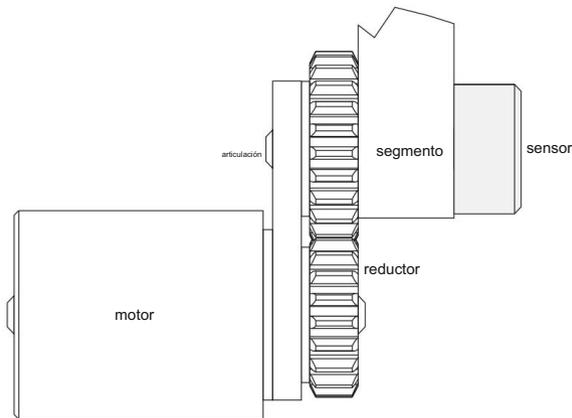


Fig. 7.2 Montaje del sensor de movimiento detrás del reductor

se coloca antes del reductor, su salida es igual al ángulo m . La variable que necesitamos para fines de control es el ángulo de articulación θ , que está determinado por la relación

$$\theta = \frac{m}{kr} \quad (7.1)$$

Derivando la Ec. (7.1) con respecto a m tenemos

$$\frac{d\theta}{dm} = \frac{1}{kr} \quad \text{1 así } d\theta = \frac{1}{kr} dm, \quad (7.2)$$

lo que significa que el error de medición del sensor se reduce por el factor kr . La ventaja de colocar el sensor antes del reductor es obtener información más precisa sobre la posición angular de la articulación.

En la Fig. 7.2 se muestra otra posibilidad de montaje del sensor. Aquí, el sensor está montado detrás del reductor. De esta forma se miden directamente los movimientos de la articulación. La calidad de la señal de control disminuye, ya que el error de medición del sensor (que ahora no se reduce) ingresa directamente al lazo de control conjunto. Como el rango de movimiento de la articulación es por el factor kr más pequeño que el del motor, se pueden usar sensores con un rango de movimiento más pequeño. A veces no podemos evitar montar el sensor de movimiento en el eje de la articulación. Es importante, por tanto, que seamos conscientes de la deficiencia de tal colocación.

7.2.2 Potenciómetro

La Figura 7.3 presenta un modelo de un potenciómetro rotatorio y sus componentes. El potenciómetro consta de dos partes: (1) devanado resistivo y (2) rascador móvil.

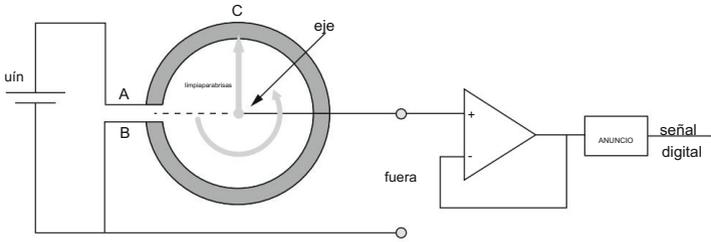


Fig. 7.3 El modelo de un potenciómetro.

El potenciómetro representa un método de medición por contacto, porque el limpiaparabrisas se desliza a lo largo del devanado resistivo circular.

Los potenciómetros generalmente se colocan detrás del reductor de tal manera que el eje del potenciómetro esté acoplado al eje de la articulación. Supongamos que el punto B representa la posición de referencia del potenciómetro perteneciente a la articulación. La resistencia del potenciómetro a lo largo del devanado AB es igual a R , mientras que r representa la resistencia de la parte CB del devanado. El ángulo del limpiaparabrisas con respecto a la posición de referencia B se denota por θ (en radianes). Cuando la resistencia a lo largo del devanado circular del potenciómetro es uniforme y la distancia entre los puntos A y B es despreciable, tenemos la siguiente ecuación

$$\frac{r}{R} = \frac{CB}{AB} = \frac{\theta}{2\pi}. \quad (7.3)$$

Supongamos que el potenciómetro está alimentado por la tensión U_{in} . El voltaje de salida medido en el limpiaparabrisas es igual a

$$\frac{fuera}{u_{in}} = \frac{r}{R} = \frac{\theta}{2\pi}, \quad (7.4)$$

o

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{2\pi} \theta \quad (7.5)$$

Midiendo la tensión de salida U_{out} , se determina la posición angular θ .

7.2.3 Codificador óptico

El enfoque de medición de contacto del ángulo de la articulación del robot utilizando potenciómetros tiene varias deficiencias. El más importante es la vida útil relativamente corta debido al alto desgaste. Además, la colocación más adecuada es directamente en el eje articular (detrás del reductor) y no en el eje motor (antes del reductor). El

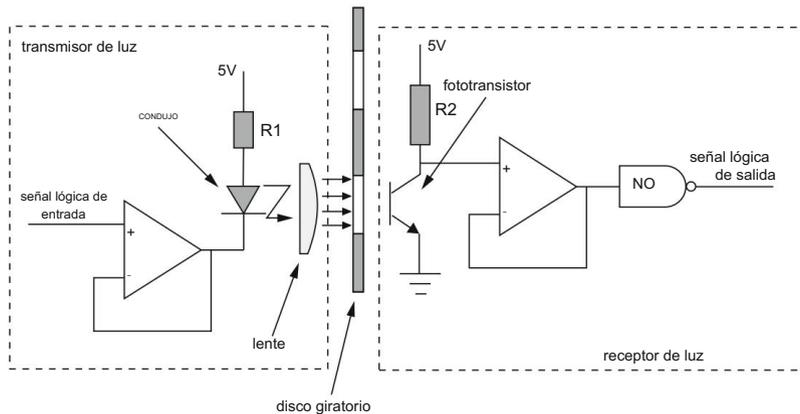


Fig. 7.4 El modelo de codificador óptico

Los sensores de movimiento más utilizados en robótica son, por lo tanto, codificadores ópticos que proporcionan una medición sin contacto.

El codificador óptico se basa en la transformación del movimiento articular en una serie de pulsos de luz, que luego se convierten en pulsos eléctricos. Para generar los pulsos de luz, se necesita una fuente de luz, generalmente un diodo emisor de luz. La conversión de luz en pulsos eléctricos se realiza mediante un fototransistor o un fotodiodo que convierte la luz en corriente eléctrica.

El modelo de un codificador óptico que evalúa la posición angular conjunta se presenta en la Fig. 7.4. Consiste en una fuente de luz con lente, detector de luz y un disco giratorio con ranuras, que está conectado al motor o al eje de la articulación. En el disco giratorio hay una pista de ranuras y espacios intermedios, que alternativamente transfieren o bloquean la luz del diodo emisor de luz al fototransistor. La salida lógica del sensor es alta cuando la luz atraviesa la ranura y golpea el fototransistor en el otro lado de la placa giratoria. Cuando el camino entre el diodo emisor de luz y el fototransistor está bloqueado por el espacio intermedio entre dos ranuras, la salida lógica es baja.

Los codificadores ópticos se dividen en absolutos e incrementales. En el texto adicional conoceremos sus propiedades más importantes.

7.2.3.1 Codificador absoluto

El codificador óptico absoluto es un dispositivo que mide la posición angular absoluta de una articulación. Su salida es una señal digital. En un sistema digital, cada línea de señal lógica representa un bit de información. Al conectar todos estos bits en una sola variable de estado lógico, el número de todos los estados lógicos posibles determina el número de todas las posiciones angulares absolutas que puede medir el codificador.

Supongamos que deseamos medir la rotación angular de 360° con el EI codificador resolución de 0.1° . absoluto debe distinguir entre 3600 estados lógicos diferentes, lo que significa que necesitamos al menos 12 bits para evaluar los ángulos de articulación con la resolución requerida. Con 12 bits podemos representar 4096 estados lógicos. Por lo tanto, un parámetro de diseño importante de los codificadores absolutos es el número de estados lógicos, que depende de los requisitos de la tarea y la ubicación del codificador (antes o después del reductor). Cuando el codificador se coloca delante de un reductor con la relación de reducción k_r , la resolución de la medición del ángulo se incrementará en el factor k_r . Cuando el codificador está detrás del reductor, la resolución necesaria del codificador está directamente determinada por la resolución requerida de la medición del ángulo de articulación. Todos los estados lógicos deben grabarse uniformemente en el disco giratorio del codificador. En la Fig. 7.5 se muestra un ejemplo de codificador absoluto con dieciséis estados lógicos. Los dieciséis estados lógicos se pueden representar mediante cuatro bits. Los dieciséis estados lógicos están grabados en la superficie del disco giratorio. El disco está dividido en dirección radial en cuatro pistas que representan los cuatro bits. Cada pista se divide en dieciséis segmentos correspondientes a los estados lógicos. Como la información sobre el desplazamiento angular está representada por cuatro bits, necesitamos cuatro pares de diodos emisores de luz y fototransistores (un par para cada bit). Con la rotación del disco, que está conectado al motor o al eje de la articulación, la señal de salida cambiará de acuerdo con los estados lógicos definidos por el orden de los segmentos (normalmente se usa el código Grey, donde dos valores sucesivos difieren en un solo bit).

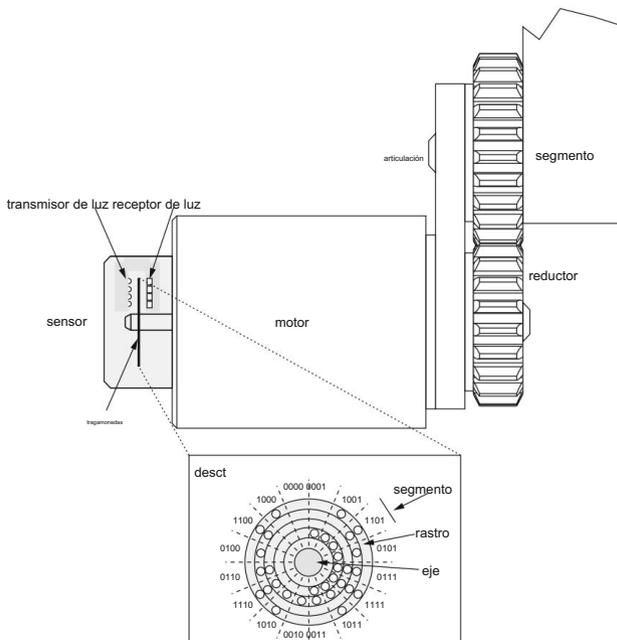


Fig. 7.5 Modelo de codificador absoluto

El codificador absoluto no determina solo la posición angular de la junta sino también la dirección de rotación.

7.2.3.2 Codificador incremental

A diferencia de los codificadores absolutos, los codificadores incrementales solo proporcionan información sobre los cambios en la posición de la articulación angular. Las ventajas de los codificadores incrementales, en comparación con los codificadores absolutos, son su simplicidad, dimensiones más pequeñas y (lo más importante) bajo costo. Esto se puede lograr reduciendo el número de pistas en el disco giratorio a una sola pista. En lugar de tener tantas pistas como el número de bits necesarios para la representación de todos los estados lógicos requeridos, ahora solo tenemos una pista con una graduación uniforme de las ranuras a lo largo del borde del disco. La Figura 7.6 muestra un modelo de un codificador incremental. Una sola pista solo requiere un solo par de diodos emisores de luz y fototransistores (par óptico). Durante la rotación del disco codificado se genera una serie de pulsos eléctricos. La medición del desplazamiento articular se basa en el conteo de estos pulsos. Su número es proporcional al desplazamiento de la articulación del robot. El codificador incremental que se muestra en la figura 7.6 genera ocho pulsos durante cada rotación. La resolución de este codificador es

$$\Delta = \frac{2\pi}{8} = \frac{\pi}{4}. \quad (7.6)$$

Al aumentar el número de ranuras en el disco, aumenta la resolución del codificador. Al indicar el número de ranuras como n_c , se puede escribir una ecuación general para la resolución del codificador

$$\Delta = \frac{2\pi}{n_c}. \quad (7.7)$$

El codificador de una sola pista solo es capaz de evaluar el cambio en la posición angular de la articulación. No puede proporcionar información sobre la dirección de rotación o la posición absoluta de la articulación. Si deseamos aplicar los codificadores incrementales en el control de robots, debemos determinar: (1) la posición inicial que representa la referencia para la medición del cambio en la posición de la articulación y (2) la dirección de rotación.

El problema de la posición inicial se resuelve agregando una ranura de referencia adicional en el disco. Esta ranura de referencia está desplazada radialmente con respecto a la pista ranurada que mide la posición angular. Para la detección de la posición inicial, se necesita un par óptico adicional. Al buscar la ranura de referencia, el robot está programado para moverse a baja velocidad, siempre que se alcance la ranura de referencia o la posición final del rango de movimiento de la articulación. En este último caso, el robot se mueve en dirección opuesta hacia la ranura de referencia.

El problema de determinar la dirección de rotación se resuelve con otro par de diodos emisores de luz y fototransistores. Este par óptico adicional se desplaza tangencial y radialmente del primer par óptico como se muestra en la Fig. 7.6. cuando el disco

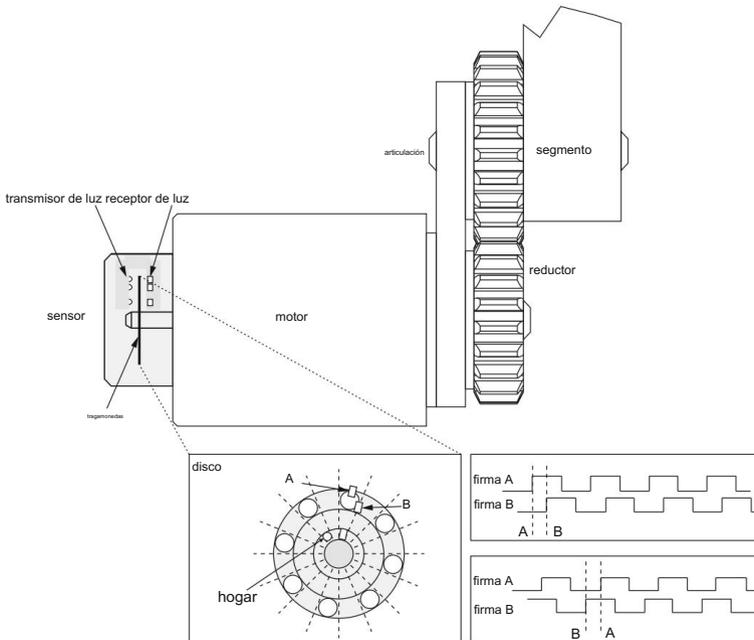


Fig. 7.6 Modelo de codificador incremental. La serie de pulsos para dirección de rotación positiva (arriba) y negativa (abajo)

gira, se obtienen dos señales que, debido al desplazamiento de los pares ópticos, están desfasadas. Este cambio de fase se produce porque cada ranura del disco llega primero al primer par óptico y, tras un breve retraso, también al segundo par.

Los componentes ópticos suelen colocarse de tal manera que se obtenga el desfase de $\pi/2$ entre las dos señales. Durante la rotación en el sentido de las agujas del reloj, la señal B tiene un desfase de $\pi/2$ detrás de la señal A. Durante la rotación en el sentido contrario a las agujas del reloj, la señal B tiene un adelanto de fase de $\pi/2$ con respecto a la señal A (Fig. 7.6).

La dirección de rotación del codificador se puede determinar sobre la base de los cambios de fase entre las señales A y B. Otra ventaja de tener dos pares ópticos es la posibilidad de contar todos los cambios en las señales A y B. El enfoque conocido como decodificación en cuadratura permite una resolución de medición de cuatro veces la resolución nominal del codificador.

7.2.4 Codificador magnético

A diferencia de los codificadores ópticos, el codificador magnético utiliza un campo magnético para medir la posición. Esto se puede lograr usando una serie de polos magnéticos (2 o más) en el rotor del sensor para representar la posición del codificador a un sensor magnético. el rotor gira

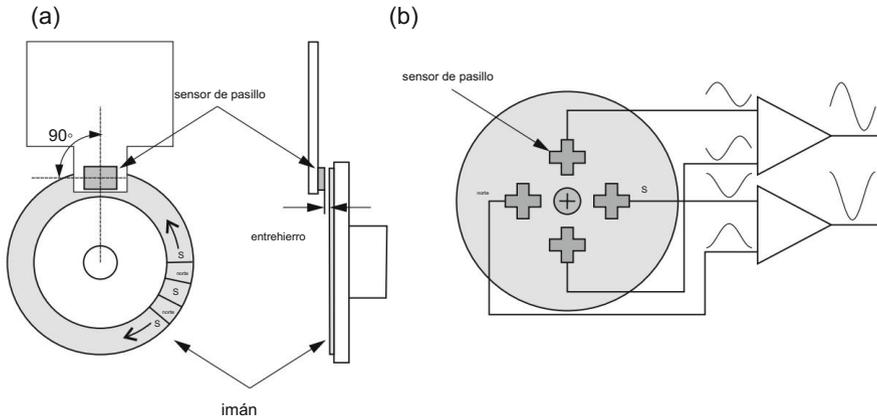


Fig. 7.7 Modelo de codificador magnético: a sensor Hall y polos norte y sur alternos y b múltiples sensores Hall con imán giratorio magnetizado diametralmente

con el eje y contiene polos norte y sur alternados uniformemente espaciados alrededor de su circunferencia. El sensor magnético (típicamente magnetorresistivo o de efecto Hall) lee las posiciones de los polos magnéticos. Los sensores Hall generan un voltaje de salida proporcional a la fuerza de un campo magnético aplicado. Los sensores magnetorresistivos detectan cambios en la resistencia causados por un campo magnético. El principio de funcionamiento se muestra en la Fig. 7.7a.

Los sensores Hall también se pueden usar para medir ángulos cuando se colocan cerca de un imán magnetizado diametralmente que genera una forma de onda sinusoidal. La limitación de este método es la ambigüedad en ángulos $>90^\circ$ en ambas direcciones desde el punto de cruce por cero. Para extender el rango de medición a 360° se requiere el método de refinamiento de la El problema se puede resolver utilizando múltiples sensores Hall, en lugar de uno, y colocándolos debajo de un imán giratorio diametralmente magnetizado para generar múltiples formas de onda sinusoidales. La figura 7.7b muestra cuatro sensores Hall equidistantes que generan cuatro señales sinusoidales, cada una desfasada 90° con respecto a su vecina. Los codificadores magnéticos suelen ser más robustos que los codificadores ópticos.

7.2.5 Tacómetro

La señal de la velocidad de la articulación puede obtenerse por diferenciación numérica de la señal de posición. Sin embargo, la medición directa de la velocidad de la articulación con la ayuda de un tacómetro se usa a menudo en robótica. La razón es el ruido introducido por la diferenciación numérica, que puede afectar en gran medida la calidad del control del robot.

Los tacómetros se pueden dividir en: (1) tacómetros de corriente continua (CC) y (2) de corriente alterna (CA). En robótica, generalmente se utilizan los tacómetros de CC más simples. El principio de funcionamiento se basa en un generador de CC cuyo campo magnético es proporcionado por imanes permanentes. Como el campo magnético es constante, el voltaje de salida del tacómetro es proporcional a la velocidad angular del rotor. Debido a que se utilizan conmutadores en los tacómetros de CC, aparece una ligera ondulación en el voltaje de salida, que no se puede filtrar por completo. Esta deficiencia, junto con otras imperfecciones, se evita mediante el uso de tacómetros de CA.

7.2.6 Unidad de medida inercial

Los potenciómetros y los codificadores ópticos miden los desplazamientos de las articulaciones en los mecanismos de los robots. Al considerar, por ejemplo, un vehículo aéreo robótico o un robot con ruedas, estos sensores no brindan información sobre la orientación del dispositivo en el espacio.

La medición de la orientación del objeto (robot) en el espacio se basa típicamente en el principio de inercia magnética. Este método combina un giroscopio (sensor de velocidad angular), un acelerómetro (sensor de aceleración lineal) y un magnetómetro (mide la orientación relativa al campo magnético de la Tierra y no se considera un sensor de inercia).

El método se ilustrará con el ejemplo de un péndulo rígido equipado con un acelerómetro de dos ejes (mide aceleraciones a lo largo de dos ejes perpendiculares) y un giroscopio de un solo eje (figura 7.8). Ambos sensores dan las cantidades medidas en sus propios marcos de coordenadas, que están unidos al centro del sensor y tienen sus ejes paralelos a los ejes x e y del marco de coordenadas adjunto al péndulo. La figura 7.8a muestra un péndulo estacionario mientras que la figura 7.8b muestra un péndulo oscilante. Estamos interesados en la orientación del péndulo en relación con el marco de coordenadas de referencia $x_0-y_0-z_0$. Dado que el péndulo solo se balancea alrededor del eje z , en realidad solo nos interesa el ángulo θ .

Primero analizamos las condiciones estacionarias. Dado que la velocidad angular de un péndulo estacionario es igual a cero, la salida del giroscopio también es cero y el giroscopio no nos dice nada sobre la orientación del péndulo. Sin embargo, podemos ver que el acelerómetro aún mide la aceleración gravitatoria. Dado que el acelerómetro está en un ángulo de θ relativo al campo gravitatorio, se miden dos componentes de aceleración: a_x y a_y .

La suma vectorial de ambas componentes da la aceleración gravitacional. La figura 7.8a muestra que el ángulo entre los vectores g y a_y es igual a θ . Como se conocen los valores escalares de las aceleraciones a_x y a_y , ahora podemos determinar el ángulo del péndulo

$$\theta = \arctan \frac{a_x}{a_y}. \quad (7.8)$$

El acelerómetro permite así medir el ángulo del péndulo en condiciones estacionarias. Por esta razón, los acelerómetros se utilizan con frecuencia como inclinómetros.

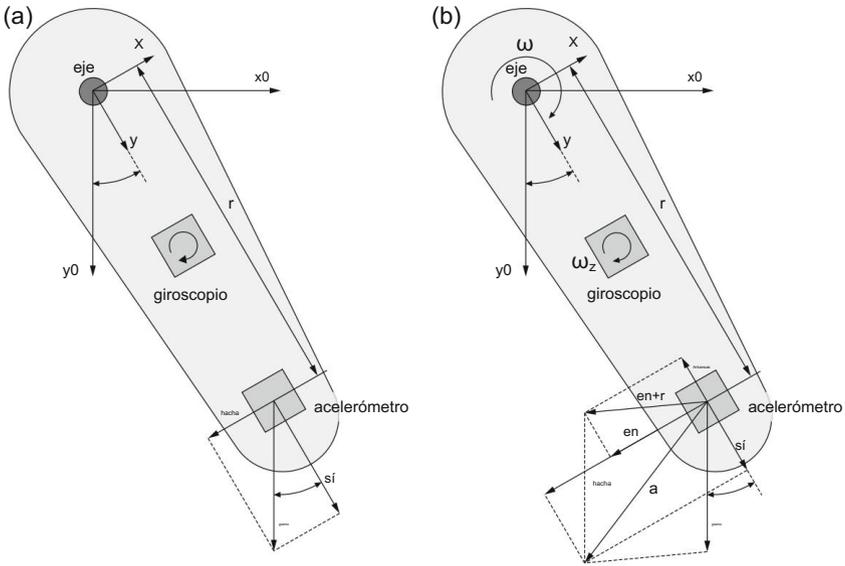


Fig. 7.8 Ejemplo de uso de un sistema de medición inercial para medir el ángulo de un péndulo: figura de la izquierda: péndulo estacionario, figura de la derecha: péndulo oscilante

Las condiciones en un péndulo oscilante son bastante diferentes. Dado que balancearse es un movimiento de rotación acelerado, el acelerómetro se ve afectado no sólo por el aceleración gravitacional g , pero también por aceleración centrípeta

$$a_r = \omega \times (\omega \times r) \tag{7.9}$$

y aceleración tangencial

$$a_t = \dot{\omega} \times r. \tag{7.10}$$

Por lo tanto, la aceleración total que actúa sobre el acelerómetro es

$$a = g + a_r + a_t. \tag{7.11}$$

La ecuación utilizada para calcular el ángulo en condiciones estacionarias (7.8) ya no es válida, por lo tanto, el acelerómetro no se puede usar para calcular el ángulo de una pluma oscilante. Sin embargo, la salida del giroscopio, que mide la velocidad angular del péndulo, ahora también está disponible. Como el ángulo del péndulo puede ser calculada como la integral temporal de la velocidad angular, la siguiente relación puede ser fijado

$$\theta = \theta_0 + \int \omega dt, \tag{7.12}$$

donde se debe conocer la orientación inicial del péndulo θ_0 .

El ejemplo dado deja claro que un acelerómetro es adecuado para mediciones de orientación en condiciones estáticas o cuasiestáticas, mientras que un giroscopio es adecuado para mediciones de orientación en condiciones dinámicas. Sin embargo, se deben mencionar dos debilidades de los acelerómetros y giroscopios. No se puede usar un acelerómetro para medir ángulos en un plano horizontal, ya que la salida del sensor es cero cuando su eje es perpendicular a la dirección de la gravedad.

Para este propósito, podemos usar un magnetómetro, que también permite medir la rotación alrededor del vector del campo de gravedad (piense en cómo funciona una brújula). Además, ni la salida del giroscopio ni la del acelerómetro son ideales. Además de la cantidad medida, la salida incluye un desplazamiento y ruido. La integración del desplazamiento provoca una deriva lineal, por lo que la ecuación. (7.12) no da una medida precisa de la orientación del péndulo. Debido a las debilidades de los sensores individuales, es común combinar tres acelerómetros perpendiculares, tres giroscopios perpendiculares y tres magnetómetros perpendiculares en un solo sistema, denominado unidad de medición magneto-inercial (IMU). La combinación de las mejores propiedades de un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro puede brindar una medición precisa y confiable de la orientación espacial.

La velocidad angular medida por el giroscopio se integra, dando una estimación de la orientación. Las mediciones del acelerómetro y el magnetómetro se utilizan para calcular directamente la orientación del sensor con referencia a los vectores de gravedad y campo magnético. Esto se logra a través de la fusión de sensores, que se puede hacer usando el filtro de Kalman.

7.3 Sensores de contacto

Los sensores considerados hasta ahora brindan información sobre la posición y el movimiento del robot. Permiten el cierre del lazo de control de posición y velocidad. En algunas tareas del robot se requiere el contacto del efector final con el entorno. Los sensores de contacto típicos utilizados en robótica son sensores táctiles y sensores de fuerza y par. Los sensores táctiles miden parámetros que definen el contacto entre el sensor y un objeto.

La detección consiste en la medición de una fuerza de contacto puntual y la distribución espacial de fuerzas perpendiculares a un área. Por el contrario, los sensores de fuerza y par miden las fuerzas totales que se aplican a un objeto.

7.3.1 Sensor táctil

Los robots pueden recopilar información sobre el medio ambiente también a través del tacto. Para aumentar las capacidades de manipulación del robot, se pueden usar sensores táctiles en los dedos robóticos, como se muestra en la figura 7.9a. El sensor proporciona datos sobre la distribución de la fuerza de contacto entre el dedo y el objeto manipulado. Para aumentar la seguridad del robot (p. ej., cuando

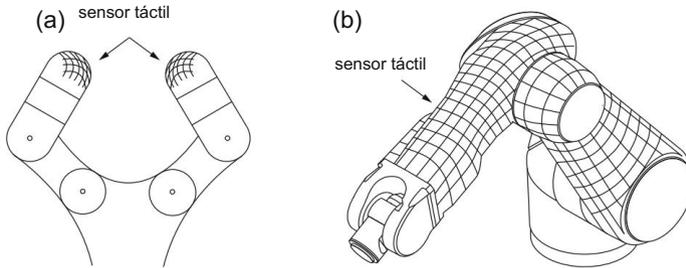


Fig. 7.9 Sensor táctil utilizado en el dedo del robot (izquierda) y como piel del robot (derecha)

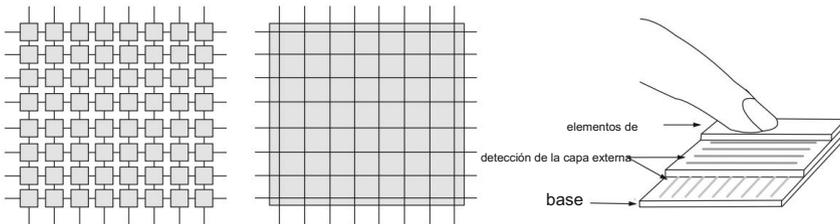


Fig. 7.10 Un modelo de un sensor táctil

trabajando con un humano), los sensores táctiles se pueden usar como una piel de robot artificial que permite que el robot detecte contactos con objetos en el entorno (Fig. 7.9b).

La detección táctil se basa en una matriz de sensores táctiles, como se muestra en la figura 7.10. El Los siguientes principios de detección se pueden implementar en la matriz:

- sensores basados en deformación: la superficie del material se deforma (cambia de longitud) cuando se somete a fuerzas externas; la deformación se convierte en señales eléctricas con galgas extensométricas conectadas en un puente de Wheatstone;
- sensores resistivos: la resistencia eléctrica cambia con la presión de un material colocado entre dos electrodos; • sensores

capacitivos: el elemento sensor es un capacitor cuya capacitancia cambia con la fuerza aplicada; la fuerza puede producir un cambio en la distancia entre las placas del capacitor o en su área;

- sensores ópticos: la detección generalmente se basa en la medición de la intensidad de la luz; la intensidad de la luz se puede modular moviendo una obstrucción o una superficie reflectante en la trayectoria de la luz; la intensidad de la luz recibida es función del desplazamiento y por tanto de la fuerza aplicada; • sensores

piezoeléctricos: los materiales, como el cuarzo, tienen propiedades piezoeléctricas y, por lo tanto, se pueden utilizar para la detección táctil; los transductores piezoeléctricos no son adecuados para la transducción de fuerza estática; este problema puede superarse haciendo vibrar el sensor y detectando la diferencia en la frecuencia de vibración debida a la fuerza aplicada;

- sensores magnéticos: los cambios de densidad de flujo magnético o el acoplamiento magnético entre circuitos son los principios más utilizados en la detección táctil magnética; •
- sensores mecánicos: los elementos de detección son microinterruptores mecánicos con encendido y fuera de los estados.

7.3.2 Interruptor de límite y tope

Los interruptores de límite se utilizan a menudo para controlar los mecanismos de los robots. Pueden detectar una sola posición de una parte móvil y, por lo tanto, son adecuados para garantizar que el movimiento no exceda un límite predefinido. Un sensor de parachoques, un tipo especial de interruptor de límite, por ejemplo, le dirá al robot si está en contacto con un objeto físico o no. Si el sensor está montado en el parachoques delantero de un robot móvil, el robot podría usar esta información para saber si se ha topado con un obstáculo, como una pared (Fig. 7.11). Las aspiradoras robóticas generalmente se basan en sensores de parachoques para navegar dentro del entorno doméstico.

7.3.3 Sensor de fuerza y par

En el caso más simple, la medición de fuerza permite la desconexión del robot cuando la fuerza de contacto supera un límite de seguridad predeterminado. En un caso más sofisticado, utilizamos sensores de fuerza para controlar la fuerza entre el efector final del robot y el entorno. Por lo tanto, no es difícil darse cuenta de que el sensor de fuerza se coloca en la muñeca del robot y, por lo tanto, a menudo se le llama sensor de muñeca.

Las galgas extensométricas se utilizan generalmente para las mediciones de fuerza. La galga extensiométrica está unida a una viga elástica que se deforma bajo el estrés causado por la fuerza aplicada. Por lo tanto, la galga extensométrica se comporta como una resistencia variable cuya resistencia cambia proporcionalmente a su deformación. El sensor de muñeca no debe influir en el

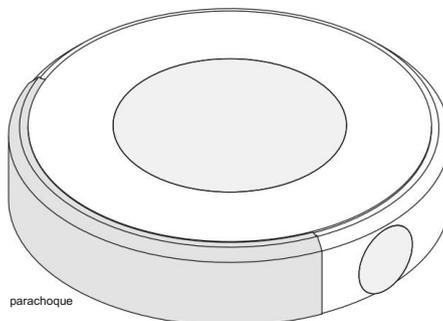


Fig. 7.11 Sensores de parachoques para usar en un robot móvil

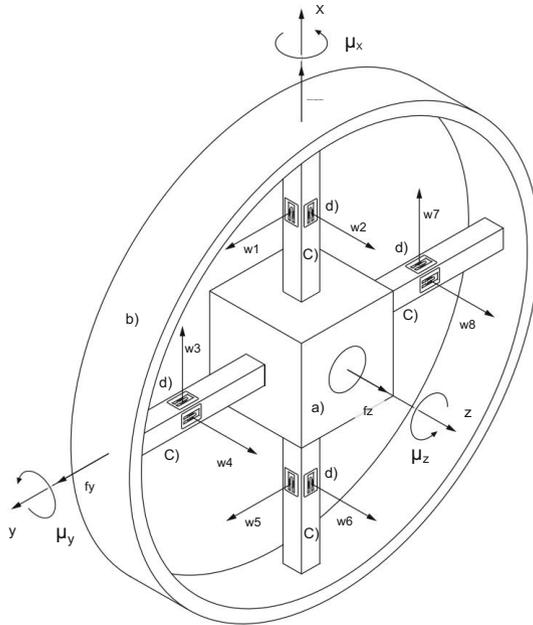


Fig. 7.12 Modelo del sensor de fuerza y par: a cuerpo rígido que está en contacto con el efector final del robot, b anillo rígido que está en contacto con el entorno del robot, c vigas elásticas y d galgas extensométricas

Interacción del robot con el entorno. Esto significa que el sensor de muñeca debe ser lo suficientemente rígido. Los sensores de muñeca del robot generalmente se diseñan como se muestra en la Fig. 7.12. La estructura del sensor se basa en tres componentes: (a) parte interna rígida que está en contacto con el efector final del robot; (b) anillo exterior rígido que está en contacto con el entorno del robot; y (c) vigas elásticas que interconectan el anillo exterior y el interior. Durante el contacto del robot con el entorno, las vigas se deforman por las fuerzas externas lo que provoca un cambio en la resistencia de las galgas extensométricas.

El vector de las fuerzas y pares que actúan en el efector final del robot está en el espacio tridimensional representado por seis elementos, tres fuerzas y tres pares.

La sección transversal rectangular de una viga (que se muestra en la figura 7.12) permite medir las deformaciones en dos direcciones. Para medir los seis elementos del vector fuerza y par, se necesitan al menos tres haces, que no sean colineales. En el ejemplo de la figura 7.12 se utilizan cuatro vigas. Hay dos galgas extensiométricas unidas a las superficies perpendiculares de cada viga. Al tener ocho galgas extensiométricas, hay ocho resistencias variables, R1 a R8. Como consecuencia de las fuerzas y pares externos, se producen deformaciones elásticas w_1 a w_8 que dan lugar a cambios en las resistencias ΔR_1 a ΔR_8 . Los pequeños cambios en la resistencia se convierten, mediante el uso del puente de piedra de trigo, en señales de voltaje (Fig. 7.13). A cada una de las ocho variables

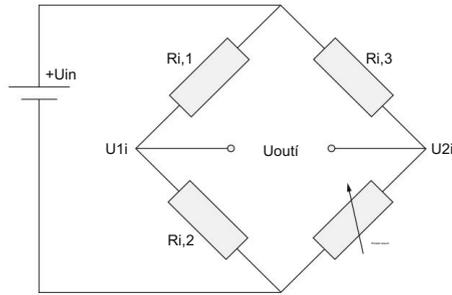


Fig. 7.13 El puente de Wheatstone

resistencias $\{R1 \dots R8\}$, se agregan tres resistencias adicionales. Las tres resistencias, junto con la galga extensométrica, están conectadas al puente de medición. El puente se alimenta con la tensión U_{in} , mientras que la tensión de salida U_{outi} está determinada por la diferencia $U1i - U2i$. El voltaje $U1i$ es

$$U1i = \frac{R_{i,2}}{R_{i,1} + R_{i,2}} u_{in}, \quad (7.13)$$

mientras que el voltaje $U2i$ es

$$R_{i,3} U2i = U_{in} \frac{R_{i,4}}{R_{i,1} + R_{i,3}} \quad (7.14)$$

El voltaje de salida es igual a

$$U_{outi} = \frac{R_{i,2}}{R_{i,1} + R_{i,2}} - \frac{R_{i,4}}{R_{i,1} + R_{i,3}} U_{in}. \quad (7.15)$$

Derivando la Ec. (7.15) con respecto a la variable R_i , se puede determinar la influencia del cambio de la resistencia de la galga extensométrica sobre el voltaje de salida

$$\Delta U_{outi} = - \frac{R_{i,3} U_{in}}{(R_{i,1} + R_{i,3})^2} \Delta R_i. \quad (7.16)$$

Antes de la aplicación, se debe calibrar el sensor de fuerza, lo que requiere la determinación de una matriz de calibración de 6×8 que transforme los seis voltajes de salida en las tres fuerzas f_x, f_y, f_z y tres pares μ_x, μ_y, μ_z

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \text{Salida1} \\ \text{Salida2} \\ \text{Salida3} \\ \text{Salida4} \\ \text{Salida5} \\ \text{Salida6} \\ \text{Salida7} \\ \text{Salida8} \end{bmatrix}, \quad (7.17)$$

dónde

$$k = \begin{pmatrix} 0 & 0 & K_{13} & 0 & 0 & 0 & K_{17} & 0 \\ K_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{32} & 0 & K_{34} & 0 & K_{36} & 0 & K_{38} \\ 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 & 0 & K_{48} & 0 \\ 0 & K_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{56} & 0 \\ K_{61} & 0 & K_{63} & 0 & K_{65} & 0 & K_{67} & 0 \end{pmatrix} \quad (7.18)$$

es la matriz de calibración con valores constantes K_{ij} .

7.3.4 Sensor de par de articulación

A menudo, es necesario o preferible medir los pares de torsión de las articulaciones en lugar de las fuerzas del efector final del robot. En tales casos, se debe utilizar un sensor de par de articulación. Al medir los pares de torsión de las articulaciones, el robot puede responder a las fuerzas aplicadas en cualquier parte de su mecanismo. Si se conoce el modelo dinámico del robot, también es posible estimar las fuerzas del efector final.

Como ejemplo, considere la Ec. (5.20). La inversa de esta ecuación daría

$$f = J^{-T}(q)T. \quad (7.19)$$

Cabe señalar que la ecuación anterior daría fuerzas de efector final exactas solo en condiciones estáticas y si la fuerza de gravedad no afecta los pares de torsión. En otras condiciones, se debe tener en cuenta el modelo dinámico del robot (5.56).

El principio de funcionamiento del sensor de par suele ser similar al del sensor de muñeca. Sin embargo, su estructura mecánica está diseñada para encajar en el eje de la articulación.

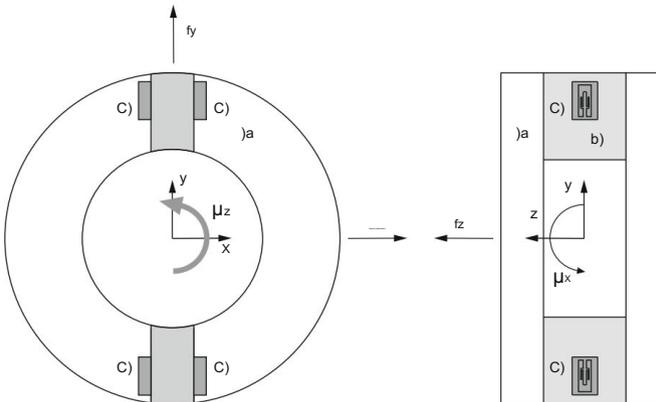


Fig. 7.14 La estructura del sensor de par de articulación mide el par μ_z : a marco, b elemento elástico y c galga extensiométrica

Por lo tanto, el sensor está integrado entre el actuador (y posiblemente el engranaje) y el segmento del robot. El sensor debe garantizar una alta sensibilidad a la torsión, baja sensibilidad a los componentes no torsionales y alta rigidez en todos los ejes de fuerzas y momentos.

La deformación de la estructura mecánica debida al par de torsión de la unión se mide utilizando galgas extensométricas. En la Fig. 7.14 se muestra una representación esquemática del sensor de par de articulación .

7.4 Sensores de proximidad y distancia

Los sensores de proximidad y alcance detectan la presencia de objetos cercanos sin ningún contacto físico. Consecutivamente, permiten distinguir entre obstáculos de diferentes formas y tamaños, así como evitar obstáculos de manera más eficiente que los sensores de contacto. Se pueden utilizar diferentes métodos para detectar obstáculos a distancia. Los métodos basados en principios magnéticos y capacitivos normalmente permiten detectar la proximidad de un objeto pero no su distancia. Cuando la distancia es relevante, se pueden considerar métodos activos como el telémetro ultrasónico, el telémetro láser y el sensor de proximidad infrarrojo, así como métodos pasivos basados en cámaras. Todos los métodos se caracterizan por una alta fiabilidad y una larga vida útil, ya que funcionan sin contacto físico entre el sensor y el objeto detectado.

7.4.1 Telémetro ultrasónico

Un telémetro ultrasónico mide la distancia a un objeto mediante el uso de ondas de sonido.

La distancia se mide enviando una onda de sonido a una frecuencia ultrasónica (las frecuencias más altas son mejores para las necesidades de corto alcance y alta precisión) y escuchando el rebote de esa onda de sonido (Fig. 7.15a) . El tiempo transcurrido entre la generación de la onda sonora y el rebote de la onda sonora se utiliza para calcular la distancia entre el sensor y el objeto (considerando que la velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente 343 m/s).

Comprender la zona de detección es importante para detectar y evitar objetos con éxito. El ancho del haz del telémetro ultrasónico generalmente se describe como un cono de cierto ángulo. Este ángulo describe el arco en el que la onda ultrasónica emana del transductor. Sin embargo, a cierta distancia, la tasa de expansión comienza a disminuir, como se muestra en la figura 7.15b. Se puede lograr una extensión del área de medición de un telémetro ultrasónico mediante el uso de múltiples unidades de sensor orientadas en diferentes ángulos (Fig. 7.15c). En tal caso, debe considerarse el problema de la diafonía.

Otros factores diferentes afectan el rendimiento de un telémetro ultrasónico. Se debe considerar el tamaño, la composición, la forma y la orientación de los objetos. En los casos presentados en las imágenes superiores de la Fig. 7.16, las mediciones normalmente son correctas, mientras que en los escenarios presentados en las imágenes inferiores de la Fig. 7.16 el telémetro ultrasónico daría resultados falsos.

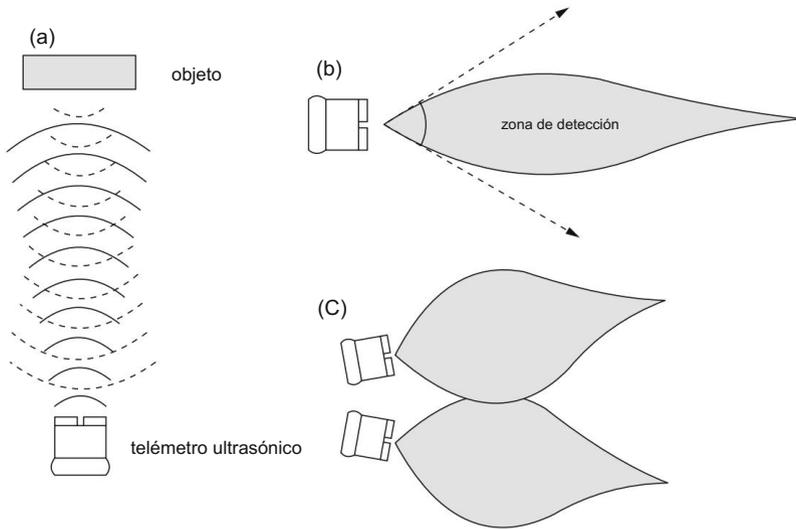


Fig. 7.15 Telémetro ultrasónico: a principio de funcionamiento, b zona de detección y c combinación de múltiples sensores

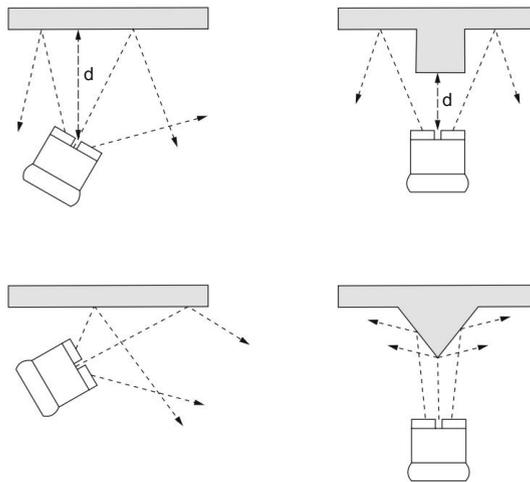


Fig. 7.16 Medición de distancia y limitaciones del telémetro ultrasónico: mediciones correctas de la distancia d (fila superior) y resultados falsos (fila inferior)

7.4.2 Telémetro láser y escáner láser

Un telémetro láser utiliza un rayo láser para determinar la distancia a un objeto. La forma más común de telémetro láser funciona según el principio del tiempo de vuelo. La distancia se puede determinar midiendo el tiempo que tarda el pulso láser en volver al

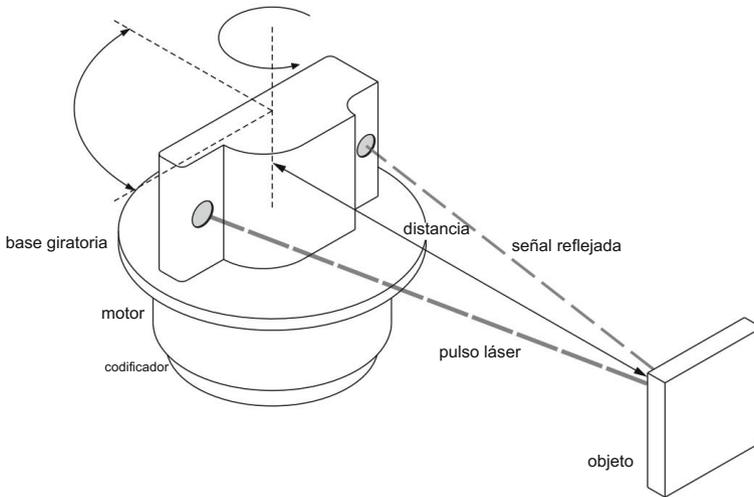


Fig. 7.17 Escáner láser

sensor y requiere una medición precisa del tiempo. Con la velocidad de la luz conocida y una medición precisa del tiempo necesario, se puede calcular la distancia. Otra posibilidad es calcular el cambio de fase de la onda de luz analizando la luz entrante y comparándola con una señal de referencia. El método más preciso para medir cambios en la distancia en lugar de distancias absolutas es la interferometría.

El telémetro láser mide la distancia a un objeto a la vez. Por lo tanto, es un sensor unidimensional. El escáner láser utiliza un láser que barre el campo de visión del sensor. Como su nombre lo indica, el instrumento consta principalmente de un láser y un escáner. Las distancias se miden como con el telémetro láser. El escáner láser produce una matriz de puntos al muestrear el entorno a un ritmo elevado. Esto generalmente se logra mediante el uso de conjuntos giratorios o espejos giratorios para barrer 360 grados alrededor del entorno. El principio de funcionamiento del escáner láser se muestra en la Fig. 7.17.

Los puntos muestreados representan posiciones de objetos en relación con el sensor. La generación de arreglos de puntos se presenta en la Fig. 7.18. La distancia dL se mide usando el láser y el ángulo de rotación L se mide típicamente usando un codificador en el conjunto giratorio. Por lo tanto, los puntos se definen en coordenadas polares. Se pueden transformar en coordenadas cartesianas (xL , yL) relativas al sensor con

$$xL = dL \cos L \text{ y } yL = dL \sen L . \quad (7.20)$$

Los puntos muestreados se pueden utilizar para generar un mapa del entorno, para la planificación de rutas y para evitar obstáculos. Un escáner tridimensional (3-D) permite escanear

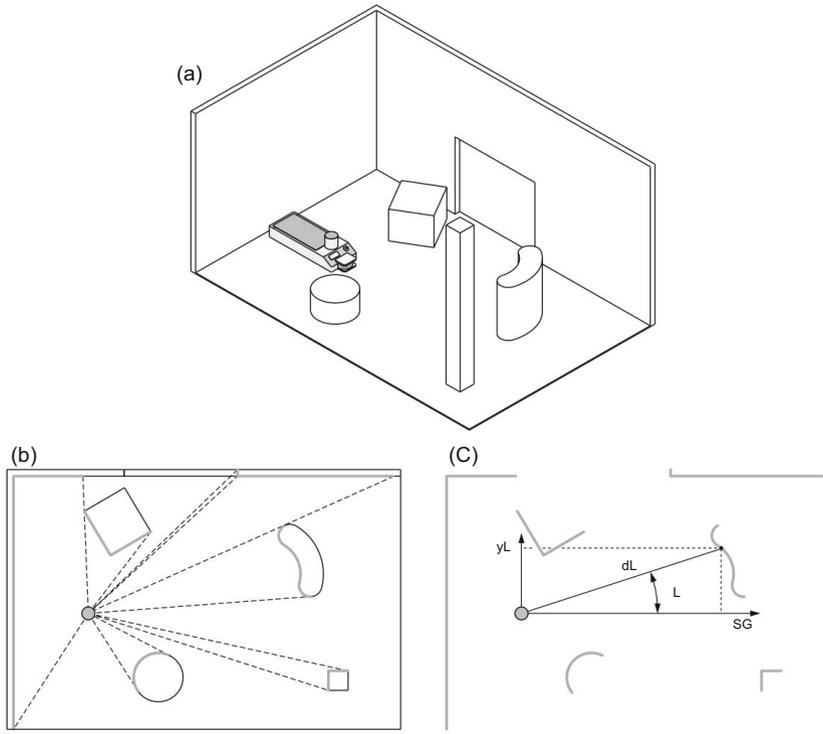


Fig. 7.18 Escáner láser utilizado para crear un mapa del entorno: entorno a, exploración b y mapa c

un espacio 3D completo y la recopilación de datos de una nube de puntos 3D mediante el uso de otro grado de libertad en el conjunto giratorio. Estos escáneres láser 3D se denominan típicamente LiDAR (Light Detection And Ranging) y se utilizan a menudo en vehículos autónomos para escanear el entorno.

Capítulo 8

Visión robótica



La tarea de la visión del robot es reconocer la geometría del espacio de trabajo del robot a partir de una imagen digital. Nuestro objetivo es encontrar la relación entre las coordenadas de un punto en la imagen bidimensional (2D) y las coordenadas del punto en el entorno real del robot tridimensional (3D).

8.1 Configuración del sistema

El sistema de visión del robot se basa en el uso de una, dos o más cámaras. Si se utilizan varias cámaras para observar el mismo objeto, se puede derivar información sobre la profundidad del objeto. En tal caso, hablamos de visión 3D o estéreo. Por supuesto, la vista 3D también se puede lograr con una sola cámara si se dispone de dos imágenes del objeto, capturadas desde diferentes poses. Si solo hay una imagen disponible, la profundidad se puede estimar en función de algunas propiedades geométricas conocidas previamente del objeto.

Al analizar la configuración del sistema de visión robótica, es necesario distinguir entre las posibles ubicaciones de las cámaras. Las cámaras se pueden colocar en una configuración fija, donde se montan rígidamente en la celda de trabajo, o en una configuración móvil, donde la cámara se conecta a un robot. En la primera configuración, la cámara observa objetos desde una posición fija con respecto al marco de coordenadas de la base del robot. El campo de visión de la cámara no cambia durante la ejecución de la tarea, lo que significa que básicamente la precisión de la medición es constante. En algunas tareas, es difícil evitar que el manipulador alcance el campo de visión de la cámara y ocluya los objetos. Por lo tanto, en tal caso, es necesario colocar una cámara en un robot (en una configuración móvil).

La cámara se puede colocar antes o después de la muñeca del robot. En el primer caso, la cámara observa la situación desde una posición favorable y el manipulador generalmente no ocluye su campo de visión. En el segundo caso, la cámara está unida al efector final del robot y, por lo general, solo observa el objeto que se está manipulando.

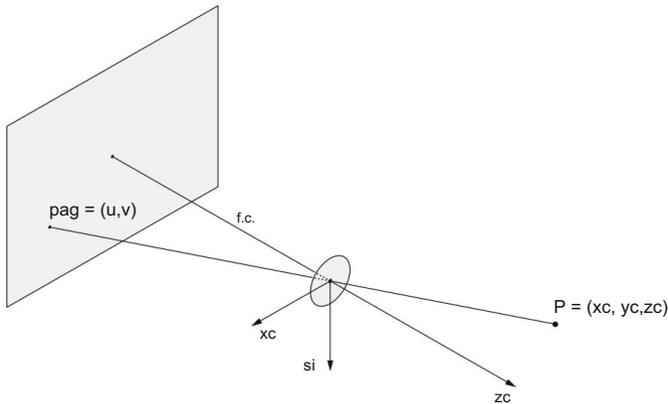


Fig. 8.1 Proyección en perspectiva

ulado En ambos casos, el campo de visión de la cámara cambia con los movimientos del manipulador. Cuando el manipulador se acerca al objeto, la precisión de la medición suele aumentar.

8.2 Proyección hacia adelante

Las ecuaciones básicas de la óptica determinan la posición de un punto en el plano de la imagen con respecto al punto correspondiente en el espacio 3D (Fig. 8.1). Encontraremos por tanto la relación geométrica entre las coordenadas del punto $P = (x_c, y_c, z_c)$ en el espacio y las coordenadas del punto $p = (u, v)$ en la imagen.

Como la apertura de las lentes de la cámara, a través de las cuales la luz cae sobre el plano de la imagen, es pequeña en comparación con el tamaño de los objetos manipulados por el robot, podemos reemplazar las lentes en nuestro modelo matemático por un simple agujero de alfiler. En la proyección en perspectiva, los puntos del espacio se proyectan sobre el plano de la imagen mediante líneas que se cruzan en un punto común denominado centro de proyección. Al reemplazar una cámara real con una cámara estenopeica, el centro de proyección se encuentra en el centro de las lentes.

Al estudiar la geometría y la cinemática del robot, adjuntamos un marco de coordenadas a cada cuerpo rígido (por ejemplo, a los segmentos del robot o a los objetos manipulados por el robot). Al considerar la visión del robot, la cámara en sí representa un cuerpo rígido y se le debe asignar un marco de coordenadas. La pose de la cámara será a partir de ahora descrita por un marco de coordenadas correspondiente. El eje z_c del marco de la cámara se dirige a lo largo del eje óptico, mientras que el origen del marco se coloca en el centro de proyección. Elegiremos un marco de mano derecha donde el eje x_c sea paralelo a las filas del sensor de imagen y el eje y_c sea paralelo a sus columnas.

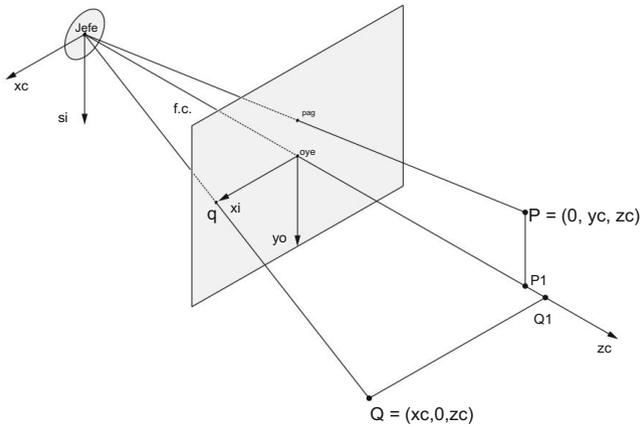


Fig. 8.2 Plano de imagen equivalente

El plano de la imagen está en la cámara, que se coloca detrás del centro de proyección. La distancia $f.c.$ entre la imagen y el centro de proyección se llama distancia focal. En el marco de la cámara, la distancia focal tiene un valor negativo, ya que el plano de la imagen intercepta el eje z_c negativo. Es más conveniente utilizar el plano de imagen equivalente colocado en un valor z_c positivo (Fig. 8.2). El plano de imagen equivalente y el plano de imagen real son simétricos con respecto al origen del cuadro de la cámara. Las propiedades geométricas de los objetos son equivalentes en ambos planos y difieren únicamente en el signo.

De ahora en adelante llamaremos al plano imagen equivalente simplemente plano imagen. Además, el plano de la imagen se puede considerar como un cuerpo rígido al que debe adjuntarse un marco de coordenadas. El origen de este cuadro se sitúa en la intersección del eje óptico con el plano de la imagen. Los ejes x_i e y_o son paralelos a los ejes x_c e y_c del marco de la cámara.

De esta forma la cámara tiene dos marcos de coordenadas, el marco de la cámara y el marco de la imagen. Sea el punto P expresado en el marco de la cámara, mientras que el punto p representa su proyección sobre el plano de la imagen. Nuestro objetivo es encontrar las relaciones entre las coordenadas del punto P y las coordenadas de su imagen p .

Supongamos primero que el punto P está ubicado en el plano y_c-z_c de la cámara marco. sus coordenadas son

$$PAG = \begin{pmatrix} 0 \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (8.1)$$

El punto p proyectado está en este caso ubicado en el eje y_o del plano de la imagen

$$p = \begin{pmatrix} 0 \\ y_o \end{pmatrix} \quad (8.2)$$

Debido a la similitud de los triángulos $P P1O_c$ y poO_c podemos escribir

$$\frac{si}{yo} = \frac{zc}{f.c.}$$

o

$$yc \cdot yi = \frac{---}{fc \cdot zc} \quad (8.3)$$

Consideremos también el punto Q que se encuentra en el plano $xc-zc$ del marco de la cámara. Después de la proyección en perspectiva del punto Q, su imagen q cae sobre el eje xi del cuadro de imagen. Debido a la semejanza de los triángulos $Q Q1O_c$ y qoO_c tenemos

$$\frac{xc}{xi} = \frac{zc}{f.c.}$$

o

$$xi = fc \cdot zc \frac{xc}{---} \quad (8.4)$$

De esta forma obtuvimos la relación entre las coordenadas (xc, yc, zc) , del punto P en el encuadre de la cámara y las coordenadas (xi, yi) , del punto p en el plano de la imagen. Las ecuaciones (8.3) y (8.4) representan la descripción matemática de la proyección en perspectiva de un espacio 3D a un espacio 2D. Ambas ecuaciones se pueden escribir en forma de ecuación matricial en perspectiva

$$s \begin{pmatrix} xi \\ yo \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 00 \\ 0 & fc & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} xc \\ si \\ zc \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8.5)$$

En la ecuación. (8.5) s es un factor de escala, mientras que (xi, yi) son las coordenadas del punto proyectado en el marco de la imagen y (xc, yc, zc) son las coordenadas del punto original en el marco de la cámara.

De la matriz Eq. (8.5) no es difícil darse cuenta de que podemos determinar únicamente las coordenadas (xi, yi) y el factor de escala s al conocer (xc, yc, zc) . Por el contrario, no podemos calcular las coordenadas (xc, yc, zc) en el marco de la cámara cuando solo se conocen las coordenadas (xi, yi) en el marco de la imagen, pero no el factor de escala. La ecuación (8.5) representa la proyección hacia adelante en la visión del robot. El cálculo de (xc, yc, zc) a partir de (xi, yi) se denomina proyección hacia atrás. Al usar una sola cámara y sin información a priori sobre el tamaño de los objetos en el entorno del robot, no se puede encontrar una solución única del problema inverso.

Para facilitar la programación, es más conveniente usar índices, marcando la posición de un píxel (es decir, el elemento más pequeño de una imagen digital) en una imagen 2D en lugar de unidades métricas a lo largo de los ejes xi e yi del marco de la imagen. Usaremos dos índices que llamaremos índice de coordenadas de un píxel (Fig. 8.3). Estos son el índice de fila y el índice de columna. En la memoria que almacena la imagen digital, el índice de fila va desde el

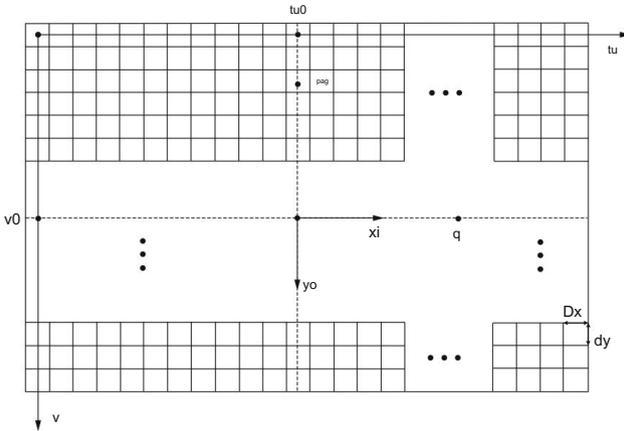


Fig. 8.3 El plano de la imagen y el marco de coordenadas de índice

desde la parte superior de la imagen hasta la parte inferior, mientras que el índice de la columna comienza a la izquierda y se detiene en el borde derecho de la imagen. Usaremos el eje \$u\$ para los índices de columna y el eje \$v\$ para los índices de fila. De esta forma, el marco de coordenadas índice \$u-v\$ pertenece a cada imagen en particular. El píxel superior izquierdo se indica con \$(0, 0)\$ o \$(1, 1)\$. Las coordenadas del índice no tienen unidades de medida.

En el texto adicional encontraremos la relación entre las coordenadas de la imagen \$(x_i, y_i)\$ y las coordenadas del índice \$(u, v)\$. Supongamos que la imagen digital se obtuvo como salida directa del sensor de imagen (la conversión A/D se realizó en la salida del sensor de imagen). En este caso cada píxel corresponde a un elemento particular del sensor de imagen. Supondremos que el área del sensor de imagen es rectangular.

El origen del cuadro de imagen está en el punto \$(u_0, v_0)\$ del cuadro índice. El tamaño de un píxel está representado por el par \$(D_x, D_y)\$. La relación entre el cuadro de imagen \$x_i-y_i\$ y el cuadro de índice \$u-v\$ se describe mediante las siguientes dos ecuaciones

$$\begin{aligned} \frac{x_i}{D_x} &= u - u_0 \\ \frac{y_i}{D_y} &= v - v_0. \end{aligned} \quad (8.6)$$

Las ecuaciones (8.6) se pueden reescribir como

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \frac{x_i}{D_x} \\ v &= v_0 + \frac{y_i}{D_y}. \end{aligned} \quad (8.7)$$

la ecuación. (8.7) representan el número de conversiones digitales a lo largo de la fila y la columna respectivamente. La ecuación (8.7) se puede reescribir en la siguiente forma matricial

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{D_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{D_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8.8)$$

Usando el modelo de cámara estenopeica, ahora podemos combinar la ecuación. (8.5), relacionando las coordenadas de la imagen con las coordenadas de la cámara, y la Ec. (8.8), que describe la relación entre la imagen y las coordenadas del índice

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{D_x} & 0 & u_0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{D_y} & v_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f_c}{D_x} & 0 & u_0 & 0 & x_c \\ 0 & \frac{f_c}{D_y} & v_0 & 0 & y_c \\ D_x & 0 & 0 & 10 & z_c \\ & & & & 1 \end{pmatrix} \quad (8.9)$$

La matriz anterior se puede escribir también de la siguiente forma

$$PAG = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \end{pmatrix} \quad (8.10)$$

La matriz P representa la proyección en perspectiva desde el marco de la cámara en el marco de coordenadas de índice correspondiente. las variables

$$f_x = \frac{f_c}{D_x} \quad (8.11)$$

$$f_y = \frac{f_c}{D_y}$$

son las distancias focales de la cámara a lo largo de los ejes x_c y y_c . Los parámetros f_x , f_y , u_0 y v_0 se denominan parámetros intrínsecos de una cámara.

En general no se conocen los parámetros intrínsecos de la cámara. Las especificaciones de la cámara y de los objetivos no son suficientemente precisas. Por lo tanto, los parámetros intrínsecos de la cámara se obtienen a través del proceso de calibración de la cámara. Al conocer los parámetros intrínsecos de la cámara, podemos calcular de forma única las coordenadas de índice (u, v) a partir de las coordenadas dadas (x_c, y_c, z_c) . Las coordenadas (x_c, y_c, z_c) no se pueden determinar a partir de las coordenadas conocidas (u, v) sin conocer el factor de escala.

8.3 Proyección hacia atrás

La imagen digital está representada por una matriz de píxeles. Como las coordenadas del índice (u, v) no tienen unidades de medida, esto significa que los rasgos característicos de la imagen se describen más cualitativamente que cuantitativamente. Si deseamos expresar las distancias en unidades métricas, debemos conocer la relación entre las coordenadas del índice (u, v) y las coordenadas (x_r, y_r, z_r) en el marco de referencia 3D. Sin conocer las dimensiones reales o la geometría de la escena es imposible reconocer las características de la imagen.

8.3.1 Cámara única

Supongamos que tenemos un sistema de visión de robot con una sola cámara. El sistema tiene la imagen del espacio de trabajo del robot como entrada y debe reproducir medidas geométricas como salida. Las transformaciones necesarias entre los marcos de coordenadas son evidentes en la figura 8.4.

Supongamos que ahora estamos en condiciones de reconocer el punto q en la imagen. Nuestro objetivo es determinar las coordenadas del punto real Q a partir de las coordenadas de su imagen q . Este es el problema de la retroproyección. Para resolver el problema, debemos saber cómo se relacionan las coordenadas del punto q con las coordenadas del punto real Q en el marco de referencia, que es el problema de la proyección hacia adelante.

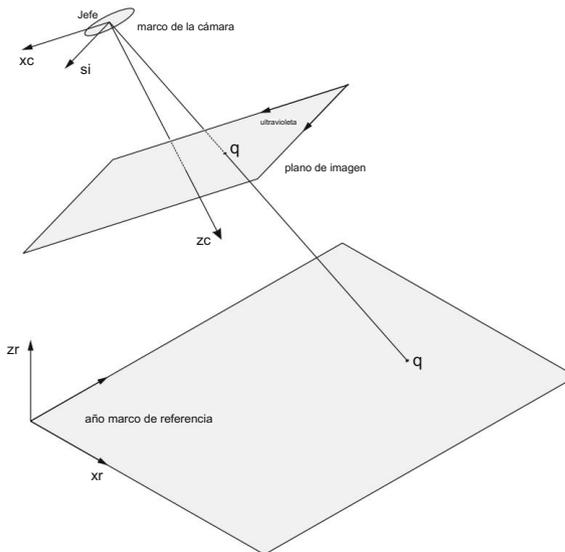


Fig. 8.4 Los marcos de coordenadas en un sistema de visión de robot

Resolvamos primero el problema de la proyección hacia adelante. El punto Q viene dado por las coordenadas (x_r, y_r, z_r) en el marco de coordenadas de referencia. Deseamos determinar las coordenadas de su imagen $q = (u, v)$, expresadas en el cuadro índice. El cuadro $x_c - y_c - z_c$ está unido a la cámara. La matriz M representa la transformación de la referencia en el marco de la cámara.

$$\begin{array}{ccc} x_c & & x_r \\ \text{Si} & = \text{METRO} & \text{año} \\ z_c & & z_r \\ 1 & & 1 \end{array} \quad (8.12)$$

Combinando las Ecs. (8.12) y (8.9), obtenemos

$$\begin{array}{ccc} & & x_r \\ s \quad v & = \text{PM} & \text{año} \\ & & z_r \\ & & 1 \end{array} \quad (8.13)$$

La relación (8.13) describe la proyección hacia adelante. Los elementos de la matriz P son los parámetros intrínsecos de la cámara, mientras que los elementos de la matriz M representan sus parámetros extrínsecos. La matriz 3×4

$$H = PM \quad (8.14)$$

se llama la matriz de calibración de la cámara. Se utiliza en el proceso de calibración para determinar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara.

En el texto posterior consideraremos la proyección hacia atrás. Nuestro objetivo es determinar las coordenadas (x_r, y_r, z_r) del punto real Q a partir de las coordenadas conocidas del punto imagen (u, v) y la matriz de calibración H. El factor de escala s no se conoce. En (8.13) tenemos cuatro incógnitas s, x_r , y_r y z_r y solo tres ecuaciones para un solo punto en el espacio.

Probemos con tres puntos A, B y C (Fig. 8.5). Conocemos las distancias entre estos tres puntos. Sus coordenadas en el marco de referencia son

$$(x_{rj}, y_{rj}, z_{rj}), j = 1, 2, 3.$$

Las coordenadas de los puntos de imagen correspondientes son

$$(u_j, v_j), j = 1, 2, 3.$$

La proyección hacia adelante se puede escribir de la siguiente forma

$$s_j \begin{array}{c} u_j \\ v_j \\ 1 \end{array} = H \begin{array}{c} x_{rj} \\ y_{rj} \\ z_{rj} \\ 1 \end{array} \quad (8.15)$$

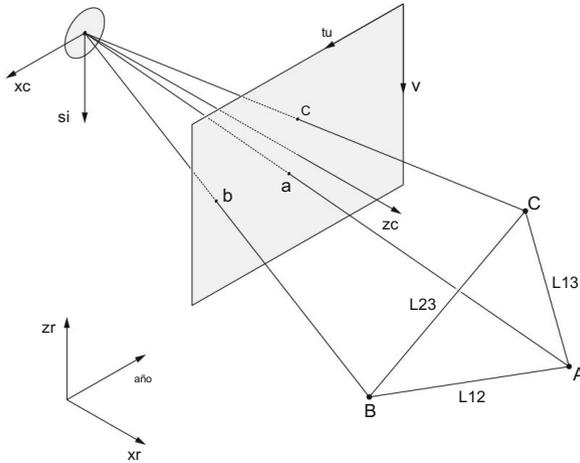


Fig. 8.5 Ejemplo de proyección de tres puntos

En la ecuación. (8.15) tenemos 12 incógnitas y 9 ecuaciones. Para resolver el problema necesitamos tres ecuaciones adicionales. Estas ecuaciones se pueden obtener a partir del tamaño del triángulo representado por los puntos A, B y C. Denotaremos los lados del triángulo AB, BC y CA como las longitudes L12, L23 y L31

$$\begin{aligned}
 L_{12}^2 &= (x_{r1} - x_{r2})^2 + (a_{ñ01} - a_{ñ02})^2 + (z_{r1} - z_{r2})^2 \\
 L_{23}^2 &= (x_{r2} - x_{r3})^2 + (a_{ñ02} - a_{ñ03})^2 + (z_{r2} - z_{r3})^2 \\
 L_{31}^2 &= (x_{r3} - x_{r1})^2 + (a_{ñ03} - a_{ñ01})^2 + (z_{r3} - z_{r1})^2.
 \end{aligned} \tag{8.16}$$

Ahora tenemos doce ecuaciones para las doce incógnitas. Por tanto, la solución del problema inverso existe. Es un inconveniente que las últimas tres ecuaciones no sean lineales, lo que requiere una computadora para la resolución numérica de las ecuaciones. El enfoque se llama proyección hacia atrás basada en modelos.

8.3.2 Visión estéreo

Dado que el modelo del objeto observado generalmente no está disponible o el objeto cambia con el tiempo, es necesario encontrar otras soluciones al problema de la proyección hacia atrás.

Una posible solución es el uso de visión estéreo: detección basada en dos cámaras. El principio es similar a la percepción visual humana donde las imágenes vistas por los ojos izquierdo y derecho difieren ligeramente debido al paralaje y el cerebro usa las diferencias entre las imágenes para determinar la distancia al objeto observado.

Para simplificar, supondremos dos cámaras paralelas que observan el punto Q como se muestra en la figura 8.6. El punto Q se proyecta en el plano de la imagen de las cámaras izquierda y derecha. El plano de imagen de la cámara izquierda contiene proyección q_l con coordenadas x_l, l y y_l, l

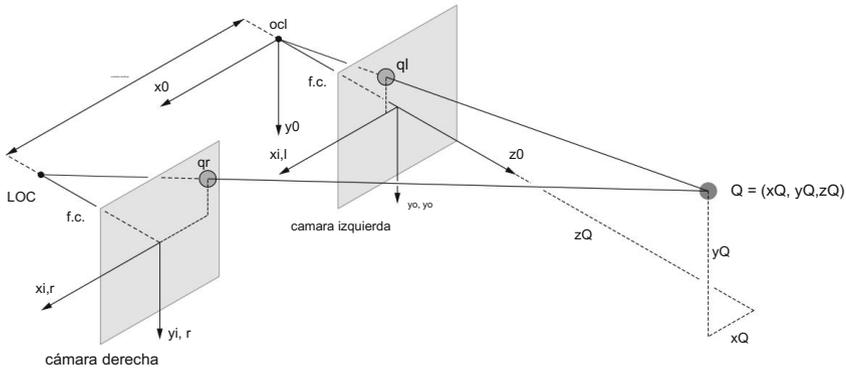


Fig. 8.6 Vista estéreo del punto Q usando dos cámaras paralelas

mientras que el plano de imagen de la cámara derecha contiene proyección q_r con coordenadas $x_{i,r}$ y $y_{i,r}$. Los ejes del marco de coordenadas del sistema de visión $x_0-y_0-z_0$ tienen las mismas direcciones que el marco de coordenadas de la cámara izquierda.

La figura 8.7a muestra la vista superior, mientras que la figura 8.7b muestra la vista lateral de la situación de la figura 8.6. Estas vistas nos ayudarán a calcular las coordenadas del punto Q. De la geometría de la figura 8.7a podemos extraer las siguientes relaciones (las distancias x_Q , y_Q y z_Q son con respecto al marco de coordenadas $x_0-y_0-z_0$)

$$\frac{x_Q}{z_Q} = \frac{x_{i,l}}{f_c} \quad (8.17)$$

$$\frac{x_Q - dc}{z_Q} = \frac{x_{i,r}}{f_c},$$

donde dc es la distancia entre las cámaras. De la primera ecuación en (8.17) expresamos

$$x_Q = z_Q \frac{x_{i,l}}{f_c} \quad (8.18)$$

e inserte en la segunda ecuación para obtener

$$\frac{x_{i,l} z_Q}{x_{i,r} f_c} - \frac{x_{i,l}}{f_c} = \frac{dc}{x_{i,r}} \quad (8.19)$$

Entonces podemos determinar la distancia z_Q al punto Q como

$$z_Q = \frac{f_c dc}{x_{i,l} - x_{i,r}} \quad (8.20)$$

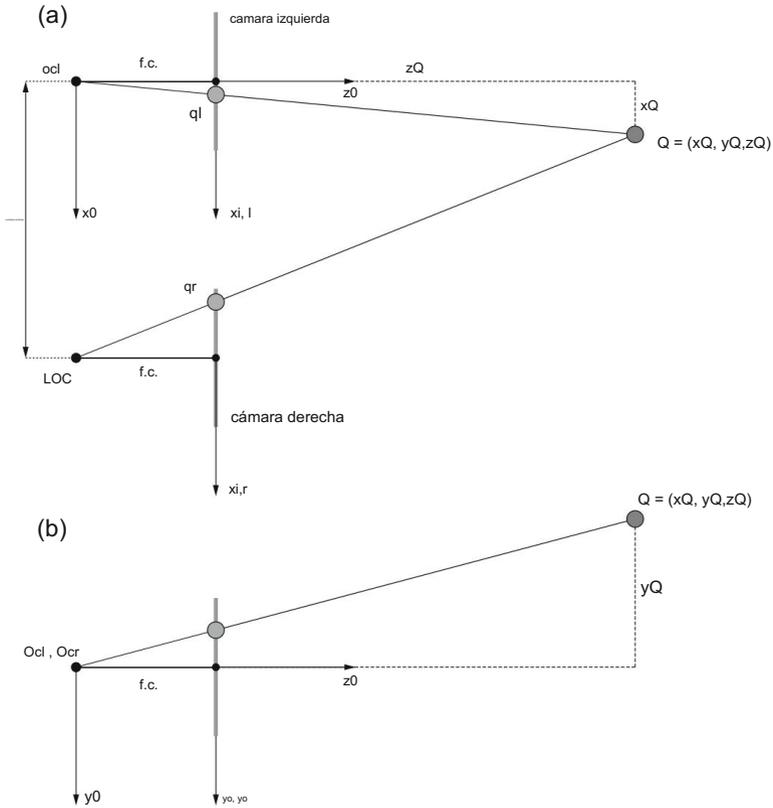


Fig. 8.7 Proyecciones del punto Q en los planos de las cámaras izquierda y derecha. La figura superior a muestra una vista de ambas cámaras desde arriba, mientras que la figura inferior b muestra una vista lateral de las cámaras

La distancia x_Q se puede determinar a partir de la ecuación. (8.18). Para determinar la distancia y_Q nos referimos a la figura 8.7b. De la geometría podemos extraer la relación

$$\frac{x_Q}{z_Q} = \frac{y_Q}{y_0}, \quad (8.21)$$

permitiéndonos calcular la coordenada restante

$$y_Q = z_Q \cdot \frac{y_{i,l}}{f.c.} \quad (8.22)$$

El uso de dos cámaras permite el cálculo de la posición (y orientación) de un objeto en el espacio sin un modelo preciso del objeto.

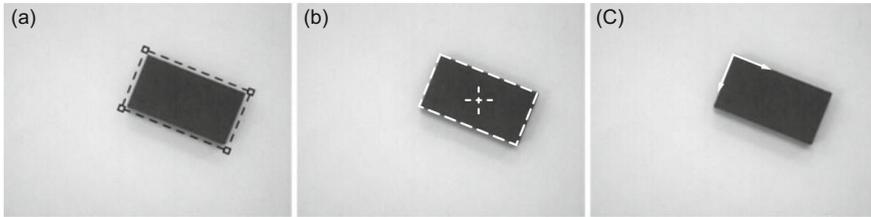


Fig. 8.8 a Definición del modelo, b características del objeto reconocido, c objeto localizado

8.4 Procesamiento de imágenes

A diferencia de la mayoría de los otros sistemas sensoriales, los sistemas visuales proporcionan información de gran alcance, que requiere algoritmos de procesamiento complejos antes de que pueda usarse para el control de robots. El objetivo del procesamiento de imágenes es obtener información numérica de la imagen, que proporciona una descripción sólida del objeto en la escena. En la Fig. 8.8 se muestra un ejemplo del resultado del procesamiento de imágenes. Primero se identifica un objeto en la escena y luego se determina su pose como se marca con el marco de coordenadas.

El procesamiento de imágenes está más allá del alcance de este libro y no se abordará específicamente aquí.

8.5 Posición del objeto a partir de la imagen

Para controlar el robot en relación con el objeto de interés, la pose del objeto debe definirse en relación con el marco de coordenadas del robot $x-y-z$. Como se muestra en la Fig. 8.8, la pose del objeto se conoce en el marco de coordenadas de la imagen después del procesamiento de la imagen. Para determinar su pose en el marco del robot, se debe definir la transformación entre la imagen y el marco de coordenadas del robot, que es el resultado de la calibración de la cámara. La Figura 8.9 presenta un enfoque simple para el problema de calibración, donde el plano de la imagen es paralelo al plano horizontal. Para simplificar, el cuadro de imagen $x_i-y_i-z_i$ está ubicado en el mismo punto que el cuadro de índice $u-v$ (el eje z_i se agregó al cuadro de imagen para enfatizar la rotación alrededor del eje vertical).

8.5.1 Calibración de la cámara

La cámara está montada en una posición fija sobre el espacio de trabajo del robot. La calibración se realiza con el patrón de calibración (tablero de ajedrez) y la punta de calibración en el efector final del robot. El patrón de calibración se puede aumentar con un marcador fiduciario, que aparece en la imagen para usar como punto de referencia o medida. El objetivo del procedimiento de calibración es encontrar la matriz de transformación H_i entre la imagen

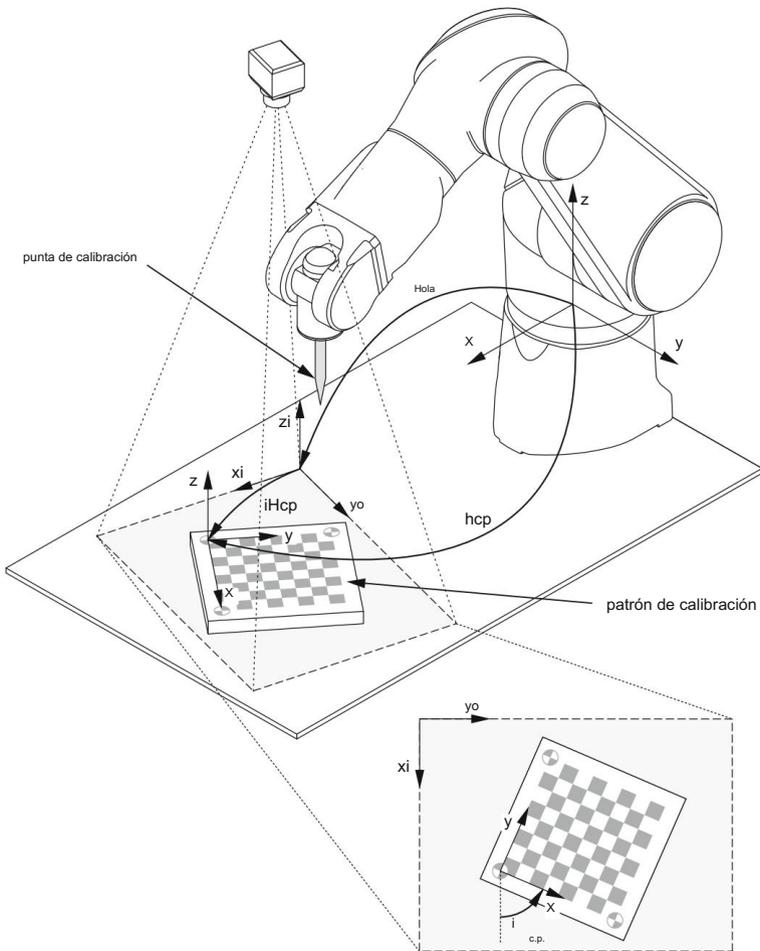


Fig. 8.9 Transformaciones utilizadas para la calibración de la cámara

y los marcos de coordenadas del robot $x_i-y_i-z_i$ y $x-y-z$. Con base en las relaciones de la figura 8.9, se puede escribir la siguiente igualdad

$$H_{cp} = H_{ola} iH_{cp}, \quad (8.23)$$

donde H_{cp} e iH_{cp} son las poses del patrón de calibración expresado en el robot y el marco de coordenadas de la imagen, respectivamente.

La pose del patrón de calibración iH_{cp} expresada en el marco de coordenadas de la imagen $x_i-y_i-z_i$ es el resultado del procesamiento de imágenes

$$iH_{cp} = \begin{pmatrix} \cos i_{cp} & -\sin i_{cp} & 0 & i_{xcp} \\ \sin i_{cp} & \cos i_{cp} & 0 & i_{ycp} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (8.24)$$

donde i_{cp} y (\cos ^o x_{cp} , ycp) son la orientación y la posición del patrón de calibración respecto al plano de la imagen, respectivamente. La posición se expresa en unidades métricas como

$$\begin{pmatrix} i_{xcp} \\ i_{ycp} \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} u_{cp} \\ v_{cp} \end{pmatrix}, \quad (8.25)$$

donde (u_{cp}, v_{cp}) son las coordenadas de origen del patrón de calibración en píxeles y λ es la relación entre la posición expresada en unidades métricas y los píxeles en la imagen (la relación se puede obtener del patrón de calibración con el tamaño conocido de los campos en blanco y negro). La matriz iH_{cp} representa una rotación alrededor del eje z_i y una traslación a lo largo de los ejes x_i e y_i del marco de coordenadas de la imagen.

La pose del patrón de calibración H_{cp} expresada en el marco de coordenadas del robot $x-y-z$ se puede determinar con la punta de calibración en el efector final del robot y los puntos de calibración marcados en el patrón de calibración. Al colocar la punta de calibración en el punto de calibración, registrar las coordenadas del efector final del robot y repetir el procedimiento para los tres puntos de calibración, se obtiene un conjunto de coordenadas que permite definir la posición del patrón de calibración en relación con el marco de coordenadas del robot como

$$H_{cp} = \begin{pmatrix} \cos cp & -\sin cp & 0 & x_{cp} \\ \sin cp & \cos cp & 0 & y_{cp} \\ 0 & 0 & 1 & z_{cp} \end{pmatrix}, \quad (8.26)$$

donde cp y (x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}) son la orientación y la posición del patrón de calibración en relación con el marco del robot, respectivamente.

De las Ecs. (8.23), (8.24) y (8.26) la matriz de transformación entre la imagen y los marcos de coordenadas del robot se pueden obtener como

$$H_{oi} = H_{cp} iH_{cp}^{-1}. \quad (8.27)$$

8.5.2 Posición del objeto

Con el H_i conocido, la posición del objeto H_o en relación con el marco de coordenadas del robot se puede determinar como se muestra en la figura 8.10.

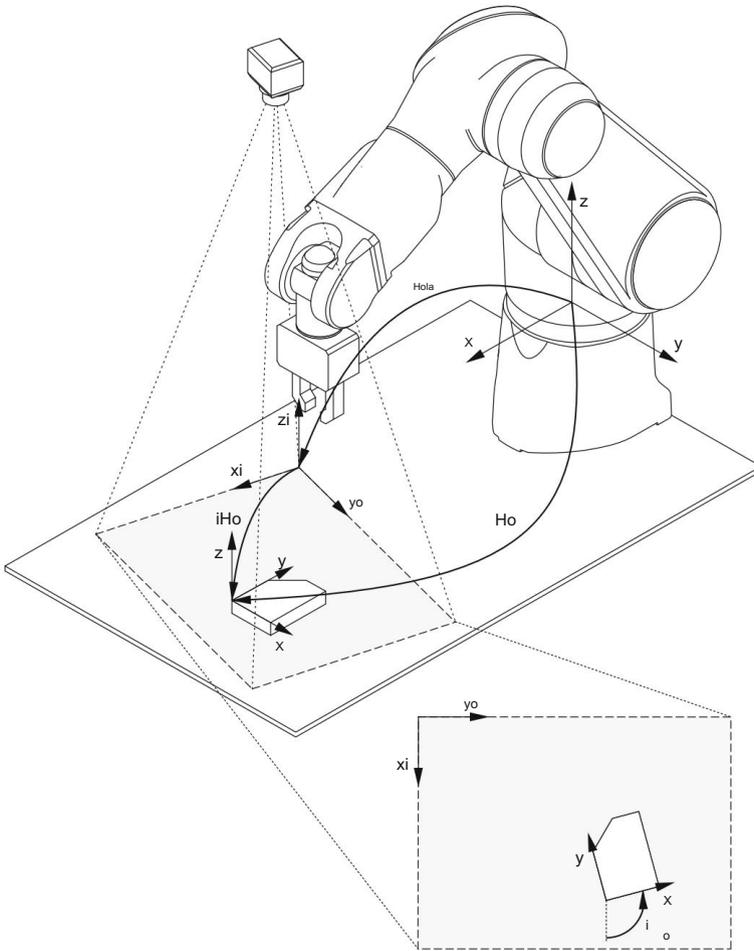


Fig. 8.10 Transformaciones utilizadas para el cálculo de la pose de un objeto

La pose del objeto iHo expresada en el marco de coordenadas de la imagen $x_i-y_i-z_i$ es el resultado del procesamiento de la imagen

$$iHo = \begin{pmatrix} \cos i_o & 0 & -\sin i_o & 0 & i_{x0} \\ 0 & \sin i_o & \cos i_o & 0 & 0 \\ \sin i_o & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.28)$$

donde θ y (x_o, y_o) son la orientación y la posición del objeto en relación con el eje de la imagen, respectivamente. La posición se expresa en unidades métricas como

$$\begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} u_o \\ v_o \end{pmatrix}, \quad (8.29)$$

donde (u_o, v_o) son las coordenadas de origen del objeto en píxeles.

Finalmente, H_o se puede determinar como

$$H_o = H_o \cdot iH_o. \quad (8.30)$$

Capítulo 9

Planificación de trayectoria



En capítulos anteriores estudiamos modelos matemáticos de mecanismos de robots. En primer lugar, nos interesaba la cinemática y la dinámica de los robots. Antes de aplicar este conocimiento al control de robots, debemos familiarizarnos con la planificación del movimiento del robot. El objetivo de la planificación de la trayectoria es generar las entradas de referencia para el sistema de control del robot, lo que garantizará que el efector final del robot siga la trayectoria deseada.

El movimiento del robot generalmente se define en el marco de coordenadas universales rectangulares ubicado en el espacio de trabajo del robot más conveniente para la tarea del robot. En la tarea más simple, solo definimos el punto inicial y final del efector final del robot. A continuación, se utiliza el modelo cinemático inverso para calcular las variables articulares correspondientes a la posición deseada del efector final del robot.

9.1 Interpolación de la trayectoria entre dos puntos

Al moverse entre dos puntos, el robot manipulador debe desplazarse desde el punto inicial hasta el punto final en un intervalo de tiempo dado t_f . A menudo no estamos interesados en la trayectoria precisa entre los dos puntos. No obstante, debemos determinar el curso temporal del movimiento para cada variable conjunta y proporcionar la trayectoria calculada a la entrada de control.

La variable de articulación es el ángulo θ para la rotación o el desplazamiento d para la articulación de traslación. Al considerar la interpolación de la trayectoria, no distinguiremos entre las articulaciones de rotación y de traslación, por lo que la variable de la articulación se denotará más generalmente como q . Con manipuladores industriales que se mueven entre dos puntos, la mayoría de las veces seleccionamos el llamado perfil de velocidad trapezoidal.

El movimiento del robot comienza en $t = 0$ con aceleración constante, seguido de la fase de velocidad constante y finaliza con la fase de desaceleración constante (Fig. 9.1).

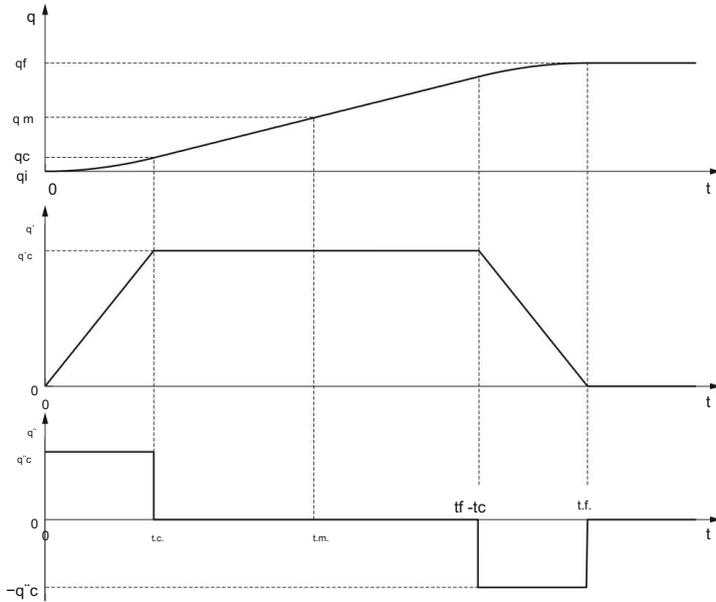


Fig. 9.1 La dependencia del tiempo de las variables conjuntas con perfil de velocidad trapezoidal

La trayectoria resultante del ángulo articular o del desplazamiento consiste en el intervalo lineal central, que comienza y concluye con un segmento parabólico. Las velocidades inicial y final del movimiento entre los dos puntos son cero. La duración de la fase de aceleración constante es igual al intervalo con la desaceleración constante. En ambas fases la magnitud de la aceleración es $q''c$. De esta manera tratamos con una trayectoria simétrica, donde

$$q_m = \frac{q_f + q_i}{2} \quad \text{f en el momento } t_m = \frac{t}{2}. \quad (9.1)$$

La trayectoria $q(t)$ debe satisfacer varias restricciones para que la articulación del robot se mueva desde el punto inicial q_i hasta el punto final q_f en el intervalo de tiempo requerido en t . La velocidad al final de la fase parabólica inicial debe ser igual a la constante t_f velocidad la fase lineal. La velocidad en la primera fase se obtiene de la ecuación que describe el movimiento de aceleración constante

$$q' = q''ct. \quad (9.2)$$

Al final de la primera fase tenemos

$$q'_c = q''ct_c. \quad (9.3)$$

La velocidad en la segunda fase se puede determinar con la ayuda de la Fig. 9.1

$$\dot{q}^c = \frac{q^m - q^c}{t^m - t^c}, \quad (9.4)$$

donde q^c representa el valor de la variable conjunta q al final de la fase parabólica inicial (es decir, en el tiempo t^c). Hasta ese momento se produce el movimiento con aceleración constante \ddot{q}^c , por lo que la velocidad viene determinada por la Ec. (9.2). La dependencia temporal de la posición conjunta se obtiene integrando la ecuación. (9.2)

$$\dot{q}^c dt^2 = \ddot{q}^c dt = \dot{q}^c q = \frac{1}{2} + q_i, \quad (9.5)$$

donde la posición conjunta inicial q_i se toma como la constante de integración. Al final de la primera fase tenemos

$$q^c = q_i + 2 \frac{1}{\ddot{q}^c t^c} \cdot \quad (9.6)$$

La velocidad al final de la primera fase (9.3) es igual a la velocidad constante en la segunda fase (9.4)

$$\dot{q}^c t^c = \frac{q^m - q^c}{t^m - t^c}. \quad (9.7)$$

Insertando la Ec. (9.6) en la ecuación. (9.7) y considerando la expresión (9.1), obtenemos, tras reordenar, la siguiente ecuación cuadrática

$$\ddot{q}^c t^c{}^2 - \dot{q}^c t^c + q^c - q_i = 0. \quad (9.8)$$

La aceleración \ddot{q}^c está determinada por el actuador seleccionado y las propiedades dinámicas del mecanismo del robot. Para q_i , q^c , \dot{q}^c y t^c elegidos, el intervalo de tiempo t^c es

$$t^c = \frac{t}{2} - \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2 t \dot{q}^c - 4(q^c - q_i)}}{\ddot{q}^c}. \quad (9.9)$$

Para generar el movimiento entre el q_i inicial y la posición final q^c se debe generar el siguiente polinomio en la primera fase

$$q(t) = q_i + \ddot{q}^c t^2 \quad 0 \leq t \leq t^c. \quad (9.10)$$

En la segunda fase se debe generar una trayectoria lineal partiendo del punto (t^c, q^c) , con pendiente \dot{q}^c

$$(q - q^c) = \dot{q}^c (t - t^c). \quad (9.11)$$

Después del reordenamiento obtenemos

$$q(t) = q_i + \ddot{q}(t_c)(t - t_c)^2 \quad t_c < t \leq (t_f - t_c) \quad (9.12)$$

En la última fase se debe generar la trayectoria parabólica de manera similar a la primera fase, solo que ahora el punto extremo está en (t_f, q_f) y la curva está invertida

$$q(t) = q_f - \ddot{q}(t_c)(t - t_f)^2 \quad (t_f - t_c) < t \leq t_f \quad (9.13)$$

De esta manera obtuvimos analíticamente la dependencia temporal del ángulo o desplazamiento de la junta de rotación o traslación moviéndose de un punto a otro.

9.2 Interpolación mediante el uso de puntos vía

En algunas tareas del robot, son necesarios movimientos del efector final más complejos que los movimientos punto a punto. En la soldadura, por ejemplo, se deben seguir las superficies curvas de los objetos. Dichas trayectorias se pueden obtener definiendo, además del punto inicial y final, también los llamados puntos vía a través de los cuales debe moverse el efector final del robot.

En este capítulo analizaremos el problema, donde deseamos interpolar la trayectoria a través de n a través de los puntos $\{q_1, \dots, q_n\}$, los cuales deben ser alcanzados por el robot en intervalos de tiempo $\{t_1, \dots, t_n\}$. La interpolación se realizará con la ayuda de perfiles trapezoidales de velocidad. La trayectoria consistirá en una secuencia de segmentos lineales que describen los movimientos entre dos puntos vía y segmentos parabólicos que representan las transiciones a través de los puntos vía. Para evitar la discontinuidad de la primera derivada en el momento t_k , la trayectoria $q(t)$ debe tener un curso parabólico en la vecindad de q_k . Al hacerlo, la segunda derivada en el punto q_k (aceleración) permanece discontinua.

La trayectoria interpolada, definida como una secuencia de funciones lineales con transiciones parabólicas a través de los puntos vía (el tiempo de transición t_k), se describe analíticamente mediante las siguientes restricciones

$$q(t) = \begin{cases} a_{1,k}(t - t_k) + a_{0,k} & t_k + \frac{t_k}{2} \leq t < t_{k+1} - \frac{t_{k+1}}{2} \\ b_{2,k}(t - t_k)^2 + b_{1,k}(t - t_k) + b_{0,k} & \frac{t_k}{2} \leq t < t_k + \frac{t_k}{2} \end{cases} \quad (9.14)$$

Los coeficientes $a_{0,k}$ y $a_{1,k}$ determinan las partes lineales de la trayectoria, donde k representa el índice del segmento lineal correspondiente. Los coeficientes $b_{0,k}$, $b_{1,k}$ y $b_{2,k}$ pertenecen a las transiciones parabólicas. El índice k representa el número consecutivo de un segmento parabólico.

Primero, las velocidades en los segmentos lineales se calcularán a partir de las posiciones dadas y los intervalos de tiempo correspondientes, como se muestra en la figura 9.2. Suponemos que las velocidades inicial y final son iguales a cero. En este caso tenemos

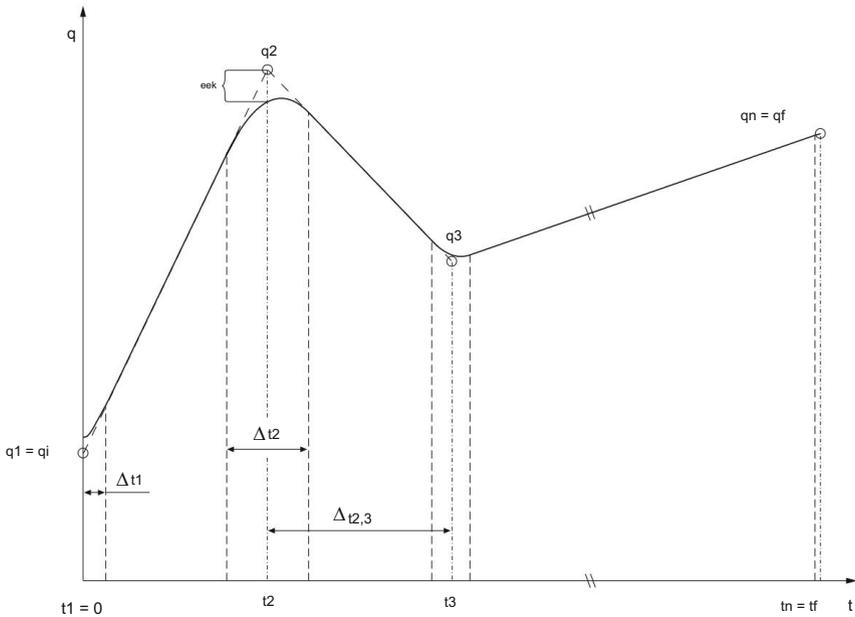


Fig. 9.2 Interpolación de trayectorias a través de n puntos vía: segmentos lineales con transiciones parabólicas son usados

$$q^{k-1,k} = \begin{cases} 0 & k = 1 \\ \frac{q_k - q_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} & k = 2, \dots, \text{norte} \\ 0 & k = \text{norte} + 1. \end{cases} \quad (9.15)$$

Además, debemos determinar los coeficientes de los segmentos lineales $a_{0,k}$ y $a_{1,k}$. El coeficiente $a_{0,k}$ se puede encontrar a partir de la función lineal (9.14), teniendo en cuenta la posición conocida en el momento t_k , cuando el segmento del robot se acerca al punto q_k

$$q(t_k) = q_k = a_{1,k}(t_k - t_k) + a_{0,k} = a_{0,k}, \quad (9.16)$$

por lo tanto

$$a_{0,k} = q_k \quad k = 1, \dots, \text{norte} - 1 \quad (9.17)$$

El coeficiente $a_{1,k}$ se puede determinar a partir de la derivada temporal de la función lineal (9.14)

$$q'(t) = a_{1,k}. \quad (9.18)$$

Considerando las velocidades dadas en el intervalo de tiempo $t_{k,k+1}$, obtenemos

$$a_{1,k} = v_{k,k+1} \quad k = 1, \dots, \text{norte} - 1. \quad (9.19)$$

De esta forma se determinan los coeficientes de los segmentos lineales de la trayectoria y podemos proceder con los coeficientes de las funciones parabólicas. Supondremos que el tiempo de transición está predeterminado como t_k .

Si no se prescribe el tiempo de transición, el valor absoluto de la aceleración $|\ddot{q}_k|$ en el punto vía debe definirse primero y luego el tiempo de transición se calcula a partir de las aceleraciones y velocidades antes y después del punto vía. En este caso solo se debe determinar el signo de la aceleración considerando el signo de la diferencia de velocidad en el punto vía

$$\ddot{q}_k = \text{signo}(\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}) |\ddot{q}_k|, \quad (9.20)$$

donde $\text{sign}(\cdot)$ significa el signo de la expresión entre paréntesis. Dados los valores de las aceleraciones en los puntos vía y las velocidades antes y después del punto vía, se calcula el tiempo de movimiento a través del punto vía t_k (desaceleración y aceleración)

$$t_k = \frac{\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}}{\ddot{q}_k}. \quad (9.21)$$

Procederemos calculando los coeficientes de las funciones cuadráticas. La continuidad requerida de la velocidad durante la transición del segmento de trayectoria lineal al parabólico en el instante $(t_k -)$ y la velocidad requerida con

la continuidad durante la transición del segmento parabólico al lineal en $(t_k +)$ representa el punto de partida para el cálculo de los coeficientes $b_{1,k}$ y $b_{2,k}$. Primero, calculamos la derivada temporal de la función cuadrática (9.14)

$$\dot{q}(t) = 2b_{2,k}(t - t_k) + b_{1,k}. \quad (9.22)$$

Asumiendo que la velocidad en el instante $(t_k -)$ es $\dot{q}_{k-1,k}$, mientras que en $(t_k +)$, él $\dot{q}_{k,k+1}$, podemos escribir

$$\begin{aligned} \dot{q}_{k-1,k} = 2b_{2,k} t_k - b_{1,k} &= -b_{2,k} t_k + b_{1,k} & t = t_k - \frac{t_k}{2} \\ \dot{q}_{k,k+1} = 2b_{2,k} t_k + b_{1,k} &= b_{2,k} t_k + b_{1,k} & t = t_k + \frac{t_k}{2} \end{aligned} \quad (9.23)$$

Sumando la Ec. (9.23), el coeficiente $b_{1,k}$ se puede determinar

$$= 2 \frac{\dot{q}_{k,k+1} + \dot{q}_{k-1,k}}{2} b_{1,k} \quad k = 1, \dots, \text{norte} \quad (9.24)$$

y restando la Ec. (9.23), se calcula el coeficiente $b_{2,k}$

$$b_{2,k} = \frac{\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}}{2t_k} = \frac{\ddot{q}_k}{2} \quad k = 1, \dots, \text{norte} \quad (9.25)$$

Teniendo en cuenta la continuidad de la posición en el instante $(t_k + \frac{t_k}{2})$, el $b_{0,k}$ del polinomio cuadrático se puede calcular. En $(t_k + \frac{t_k}{2})$, la posición $q(t)$, calculado a partir de la función lineal

$$q(t_k + \frac{t_k}{2}) = a_{1,k} t_k + \frac{t_k}{2} - t_k + a_{0,k} = \dot{q}_{k,k+1} \frac{t_k}{2} + q_{k,2} \quad (9.26)$$

es igual a la posición $q(t)$, calculada a partir de la función cuadrática

$$\begin{aligned} q(t_k + \frac{t_k}{2}) &= b_{2,k} t_k^2 + \frac{t_k}{2} - t_k + b_{1,k} t_k + \frac{t_k}{2} - t_k + b_{0,k} \\ &= \frac{\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}}{2} \frac{t_k^2}{2} + \frac{\dot{q}_{k,k+1} + \dot{q}_{k-1,k}}{2} \frac{t_k}{2} + b_{0,k} \end{aligned} \quad (9.27)$$

Igualando (9.26) y (9.27) se determina el coeficiente $b_{0,k}$,

$$b_{0,k} = q_k + (\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}) \frac{t_k}{8} \quad (9.28)$$

Se puede verificar que el coeficiente $b_{0,k}$ calculado asegura también la continuidad de posición en el instante $(t_k - \frac{t_k}{2})$. La elección del coeficiente $b_{0,k}$ evita que la trayectoria conjunta pase por el punto q_k . El robot solo se acerca más o menos a este punto. La distancia de la trayectoria calculada desde el punto de referencia depende principalmente del intervalo de tiempo de aceleración y desaceleración t_k , que está predeterminado por la aceleración requerida $|\ddot{q}_k|$. El error e_k de la trayectoria calculada se puede estimar comparando la posición deseada q_k con la posición real $q(t)$ en el instante t_k , que se obtiene al insertar t_k en la función cuadrática (9.14)

$$e_k = q_k - q(t_k) = q_k - b_{0,k} = -(\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}) \frac{t_k}{8} \quad (9.29)$$

Se puede notar que el error e_k es igual a cero solo cuando las velocidades de los segmentos lineales antes y después de los puntos vía son iguales o cuando el intervalo de tiempo t_k es cero, lo que significa una aceleración infinita (que en realidad no es posible).

El enfoque descrito para la interpolación de la trayectoria tiene una deficiencia menor. De la ecuación (9.29) se puede observar que, en lugar de llegar al punto vía, el robot lo rodea. Como los puntos inicial y final de la trayectoria también se consideran puntos vía, se introduce un error en la planificación de la trayectoria. En el punto inicial de la trayectoria, la posición real y la deseada difieren por el error e_1 (Fig. 9.3, la curva de luz muestra la trayectoria sin corrección), que surge de la ecuación (9.29). El error representa un paso en la señal de posición, lo que no se desea en robótica. Para evitar este cambio abrupto de posición, el primer y el último punto de la trayectoria deben manejarse por separado de los puntos vía.

Las velocidades requeridas en los puntos inicial y final deben ser cero. La velocidad al final del intervalo de tiempo t_1 debe ser igual a la velocidad en el primer

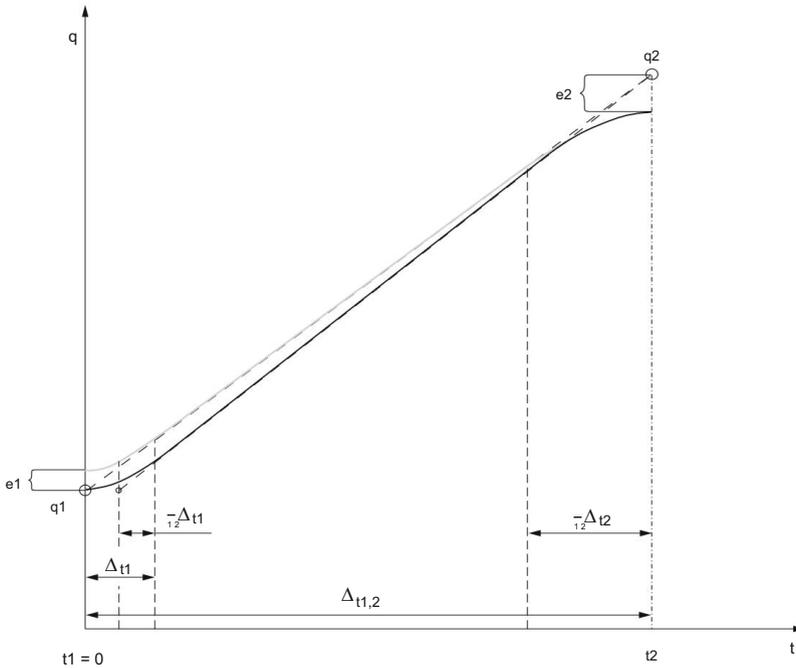


Fig. 9.3 Interpolación de trayectoria: presentación ampliada del primer segmento de la trayectoria que se muestra en la Fig. 9.2. La curva más clara representa la trayectoria sin corrección, mientras que la curva más oscura muestra la trayectoria corregida

segmento lineal. Primero calculamos la velocidad en la parte lineal

$$\dot{q}^{1,2} = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1 - \frac{1}{2}t_1} \quad (9.30)$$

La ecuación (9.30) es similar a la ecuación (9.15), solo que ahora se resta $\frac{1}{2}t_1$ en el denominador, ya que en el breve intervalo de tiempo (el comienzo del segmento parabólico en la Fig. 9.3) la posición del robot cambia solo en una medida muy pequeña. Al hacerlo, se obtiene una mayor velocidad en el segmento lineal de la trayectoria. Al final del intervalo de aceleración t_1 tenemos

$$\frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1 - \frac{1}{2}t_1} = \ddot{q}^1 t_1 \quad (9.31)$$

Debemos determinar también la aceleración \ddot{q}^1 en el punto inicial de la trayectoria. Suponiendo que su valor absoluto $|\ddot{q}^1|$ estaba predeterminado, sólo se debe seleccionar adecuadamente el signo. La elección del signo se realizará en base a la diferencia posicional. En principio, la diferencia de velocidad debe tenerse en cuenta

Sin embargo, al determinar el signo de la aceleración, la velocidad inicial es cero y, por lo tanto, el signo puede depender de la diferencia de posiciones.

$$q''1 = \text{signo}(q2 - q1) |q''1|. \quad (9.32)$$

De la ecuación. (9.31), el intervalo de tiempo $t1$ se calcula

$$1 (q2 - q1) = q''1 t1 (t2 - t1 - 2 \quad - \quad t1). \quad (9.33)$$

Después del reordenamiento obtenemos

$$- 4 q''1 t 2_1^2 + q''1 (t2 - t1) t1 - (q2 - q1) = 0, \quad (9.34)$$

entonces el intervalo de tiempo $t1$ es

$$t1 = \frac{-q''1(t2 - t1) \pm \sqrt{q''1^2(t2 - t1)^2 - 2q''1(q2 - q1)}}{-q''1}, \quad (9.35)$$

y después de simplificar la Ec. (9.35)

$$t1 = (t2 - t1) - (t2 - t1) \sqrt{2 - \frac{2(q2 - q1)}{q''1}}. \quad (9.36)$$

En la ecuación. (9.36), el signo menos se seleccionó antes que la raíz cuadrada, porque el intervalo de tiempo $t1$ debe ser más corto que $(t2 - t1)$. De la ecuación. (9.30), se puede calcular la velocidad en la parte lineal de la trayectoria. Como es evidente en la Fig. 9.3 (la curva más oscura representa la trayectoria corregida), la corrección introducida elimina el error en la posición inicial.

De manera similar, como para el primer segmento, la corrección debe calcularse también para el último segmento entre los puntos q_{n-1} y q_n . La velocidad en el último segmento lineal es

$$q'_{n-1,n} = \frac{q_n - q_{n-1}}{t_n - t_{n-1} - 2t_{n-1}}. \quad (9.37)$$

En el denominador de la Ec. (9.37) se restó el valor $\frac{1}{2}t_n$, ya que inmediatamente antes de la parada completa del robot, su posición cambia muy poco. En la transición del último segmento lineal al último segmento parabólico las velocidades son iguales

$$\frac{q_n - q_{n-1}}{t_n - t_{n-1} - 2t_{n-1}} = q''_n t_n. \quad (9.38)$$

La aceleración (desaceleración) del último segmento parabólico se determina en el base de la diferencia posicional

$$q''_n = \text{signo}(q_{n-1} - q_n) | \ddot{q}_n |. \quad (9.39)$$

Insertando la ecuación anterior en la Ec. (9.38), calculamos, de manera similar a como para el primer segmento parabólico, también la duración del último segmento parabólico

$$t_n = (t_n - t_{n-1}) - (t_n - t_{n-1}) \sqrt{2 - \frac{2(q_n - q_{n-1})}{q''_n}}. \quad (9.40)$$

De la ecuación. (9.37), se puede determinar la velocidad del último segmento lineal. Al considerar las correcciones al inicio y al final de la trayectoria, el curso del tiempo a través de los puntos vía se calcula. De esta forma se interpola toda la trayectoria en los n puntos.

Capítulo 10

control de robots



El problema del control del robot se puede explicar como un cálculo de las fuerzas o pares que deben generar los actuadores para cumplir con éxito la tarea del robot. Deben garantizarse las condiciones de trabajo adecuadas tanto durante el período transitorio como en el estado estacionario. La tarea del robot puede presentarse como la ejecución de los movimientos en un espacio libre, donde se realiza el control de posición, o en contacto con el entorno, donde se requiere el control de la fuerza de contacto. En primer lugar, estudiaremos el control de posición de un mecanismo de robot que no está en contacto con su entorno. Luego, en el texto adicional actualizaremos el control de posición con el control de fuerza.

El problema del control de robots no es único. Existen varios métodos que difieren en su complejidad y en la efectividad de las acciones del robot. La elección del método de control depende de la tarea del robot. Una diferencia importante es, por ejemplo, entre la tarea en la que el efector final del robot debe seguir con precisión la trayectoria prescrita (por ejemplo, soldadura por láser) y otra tarea en la que solo se requiere que el efector final del robot alcance la pose final deseada, mientras que los detalles de la trayectoria entre el punto inicial y el final no son importantes (por ejemplo, paletización). La estructura mecánica del mecanismo del robot también influye en la selección del método de control adecuado. El control de un robot manipulador cartesiano en general difiere del control de un robot antropomórfico.

El control del robot generalmente se lleva a cabo en el marco de coordenadas universales, que es definido por el usuario y también se denomina marco de coordenadas de la tarea del robot. En lugar de marco de coordenadas mundiales, a menudo usamos una expresión más corta, a saber, coordenadas externas. Estamos predominantemente interesados en la pose del efector final del robot expresada en las coordenadas externas y rara vez en las posiciones de las articulaciones, que también se denominan coordenadas internas. No obstante, debemos ser conscientes de que en todos los casos controlamos directamente las coordenadas internas (es decir, los ángulos o desplazamientos de las articulaciones). La pose del efector final solo se controla indirectamente. Está determinado por el modelo cinemático del mecanismo del robot y los valores dados de las coordenadas internas.

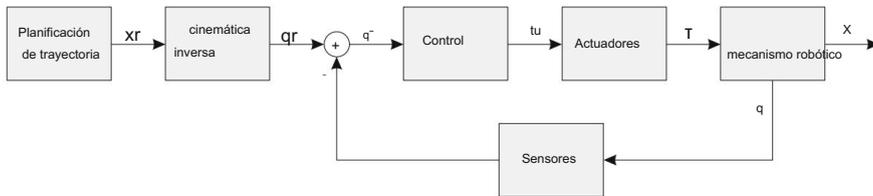


Fig. 10.1 Un sistema de control de robot general

La Figura 10.1 muestra un sistema de control de robot general. La entrada al sistema de control es la pose deseada del efector final del robot, que se obtiene mediante el uso de métodos de interpolación de trayectorias, presentados en el capítulo anterior. La variable x_r representa la deseada (es decir, la pose de referencia) del efector final del robot. El vector x , que describe la pose real del efector final del robot, en general comprende seis variables. Tres de ellos definen la posición del punto final del robot, mientras que los otros tres determinan la orientación del efector final del robot. Así, escribimos $x = xyz \quad \psi T$.

La posición del efector final del robot está determinada por el vector desde el origen del marco de coordenadas universales hasta el punto final del robot. La orientación del efector final se puede presentar de varias formas. Una de las posibles descripciones es la denominada notación RPY, proveniente de la aeronáutica y que se muestra en la Fig. 4.4. La orientación está determinada por el ángulo alrededor del eje z (balanceo), el ángulo alrededor del eje y (cabeceo) y el ángulo ψ alrededor del eje x (guiñada).

Mediante el uso del algoritmo de cinemática inversa, se calculan las coordenadas q_r que corresponden a la pose deseada del efector final. La variable q_r representa la posición de la articulación (es decir, el ángulo para la articulación de rotación y la distancia d para la articulación de traslación). Las coordenadas internas deseadas se comparan con las coordenadas internas reales en el sistema de control del robot. Sobre la base del error posicional $q̄ = q_r - q$ se calcula la salida u del sistema de control. La salida u se convierte de una señal digital a una analógica, se amplifica y se entrega a los actuadores del robot. Los actuadores aseguran las fuerzas o pares necesarios para el movimiento del robot requerido. El movimiento del robot es evaluado por los sensores que se describieron en el capítulo dedicado a los sensores del robot.

10.1 Control del Robot en Coordenadas Internas

El enfoque de control de robot más simple se basa en controladores donde el lazo de control se cierra por separado para cada grado de libertad particular. Dichos controladores son adecuados para el control de sistemas independientes de segundo orden con parámetros de amortiguación e inercia constantes. Este enfoque es menos adecuado para sistemas robóticos caracterizados por un comportamiento no lineal y variable en el tiempo.

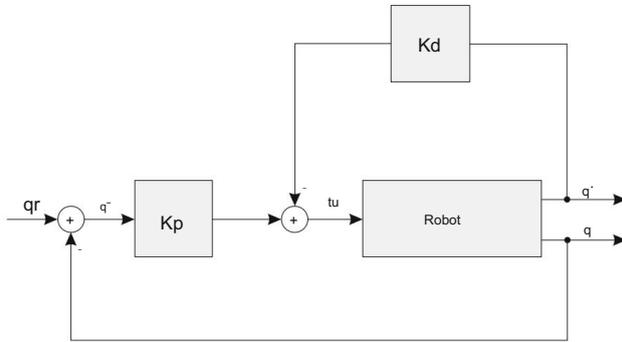


Fig. 10.2 Control de posición PD con alta amortiguación

10.1.1 PD Control de Posición

Primero, se analizará un controlador proporcional-derivativo (PD) simple. El esquema de control básico se muestra en la Fig. 10.2. El control se basa en el cálculo del error posicional y la determinación de los parámetros de control, que permiten la reducción o supresión del error. El error de posición se reduce para cada articulación por separado, lo que significa que se deben desarrollar tantos controladores como grados de libertad. Las posiciones de referencia q_r se comparan con las posiciones reales de las articulaciones del robot q

$$\tilde{q} = q_r - q. \quad (10.1)$$

El error de posición \tilde{q} es amplificado por la ganancia de posición proporcional K_p . Como un robot manipulador tiene varios grados de libertad, el error \tilde{q} se expresa como un vector, mientras que K_p es una matriz diagonal de las ganancias de todos los controladores conjuntos. La entrada de control calculada provoca el movimiento del robot en la dirección de reducción del error de posición. Como la actuación de los motores del robot es proporcional al error, puede suceder que el robot se sobrepase en lugar de detenerse en la posición deseada. Dichos excesos no están permitidos en robótica, ya que pueden provocar colisiones con objetos en las inmediaciones del robot. Para garantizar acciones seguras y estables del robot, se introduce un bucle cerrado de velocidad con signo negativo. El lazo cerrado de velocidad trae amortiguación al sistema. Está representado por las velocidades conjuntas reales \dot{q} multiplicadas por una matriz diagonal de ganancias de velocidad K_d .

La ley de control se puede escribir de la siguiente forma

$$u = K_p(q_r - q) - K_d\dot{q}, \quad (10.2)$$

donde u representa las entradas de control (es decir, las fuerzas conjuntas o pares), que deben proporcionar los actuadores. De la ecuación. (10.2) podemos notar que a velocidades más altas de los movimientos del robot, el lazo de control de velocidad reduce la actuación de la articulación y, al amortiguar el sistema, asegura la estabilidad del robot.

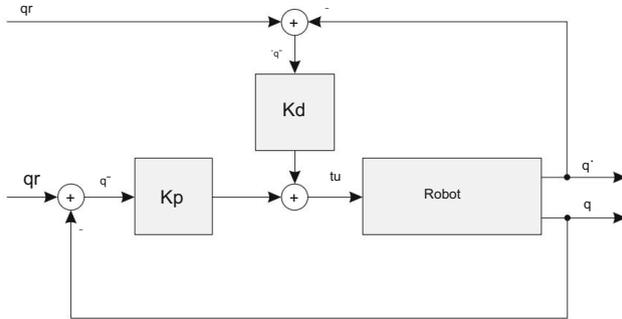


Fig. 10.3 Control de posición PD

El método de control que se muestra en la Fig. 10.2 proporciona una alta amortiguación del sistema en la parte más rápida de la trayectoria, lo que generalmente no es necesario. Tal comportamiento del controlador se puede evitar actualizando el controlador PD con la señal de velocidad de referencia. Esta señal se obtiene como la derivada numérica de la posición deseada.

El error de velocidad se utiliza como entrada de control.

$$\dot{q}^- = \dot{q}^r - \dot{q}^-. \quad (10.3)$$

El algoritmo de control demostrado en la figura 10.3 se puede escribir como

$$u = K_p(q^r - q) + K_d(\dot{q}^r - \dot{q}^-). \quad (10.4)$$

Como se utiliza la diferencia entre la velocidad de referencia \dot{q}^r y \dot{q}^- en lugar de la velocidad total \dot{q}^- , se reduce el efecto de amortiguamiento. Para una diferencia positiva, el lazo de control puede incluso acelerar el movimiento del robot.

La síntesis del controlador de posición PD consiste en determinar las matrices K_p y K_d .

Para una respuesta rápida, las ganancias de K_p deben ser altas. Mediante la elección adecuada de las ganancias de K_d , se obtiene una amortiguación crítica de los sistemas de robot. La amortiguación crítica garantiza una respuesta rápida sin sobreimpulso. Dichos controladores deben construirse para cada articulación por separado. El comportamiento de cada controlador es completamente independiente de los controladores pertenecientes a las otras articulaciones del mecanismo del robot.

10.1.2 PD Control de Posición con Compensación por Gravedad

En el capítulo sobre dinámica de robots encontramos que el mecanismo del robot está bajo la influencia de fuerzas inerciales, de Coriolis, centrípetas y gravitatorias (5.56). En general, las fuerzas de fricción que se producen en las articulaciones del robot también deben incluirse en el modelo dinámico del robot. En un modelo algo simplificado, solo se tendrá en cuenta la fricción viscosa, que es proporcional a la velocidad de la articulación (F_v es una matriz diagonal de la

coeficientes de fricción articular). Las fuerzas enumeradas deben ser superadas por los actuadores del robot, lo cual es evidente a partir de la siguiente ecuación, similar a la Eq. (5.56)

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Fv\dot{q} + g(q) = \tau. \quad (10.5)$$

Al desarrollar el controlador PD, no prestamos atención a las fuerzas específicas que influyen en el mecanismo del robot. El controlador del robot calculó las fuerzas de actuación requeridas únicamente sobre la base de la diferencia entre las posiciones deseadas y reales de las juntas. Dicho controlador no puede predecir la fuerza necesaria para producir el movimiento deseado del robot. Como la fuerza se calcula a partir del error de posición, esto significa que, en general, el error nunca es igual a cero. Al conocer el modelo de robot dinámico, podemos predecir las fuerzas que son necesarias para el desempeño de un movimiento de robot en particular. Luego, estas fuerzas son generadas por los motores del robot independientemente de la señal de error de posición.

En condiciones cuasiestáticas, cuando el robot está parado o moviéndose lentamente, podemos asumir aceleraciones $\ddot{q} \approx 0$ cero y velocidades $\dot{q} \approx 0$. El modelo dinámico del robot se simplifica de la siguiente manera

$$\tau \approx g(q). \quad (10.6)$$

De acuerdo con la Ec. (10.6), los motores del robot deben ante todo compensar el efecto de la gravedad. El modelo de efectos gravitacionales $\hat{g}(q)$ (el circunflejo denota el modelo de robot), que es una buena aproximación de las fuerzas gravitatorias reales $g(q)$, se puede implementar en el algoritmo de control que se muestra en la figura 10.4. El controlador PD, que se muestra en la Fig. 10.2, se actualizó con un lazo de control adicional, que calcula las fuerzas gravitatorias desde la posición real del robot y las agrega directamente a la salida del controlador. El algoritmo de control que se muestra en la figura 10.4 se puede escribir de la siguiente manera

$$u = K_p(q_r - q) - K_d\dot{q} + \hat{g}(q). \quad (10.7)$$

Al introducir la compensación por gravedad, la carga de reducir los errores causados por la gravedad se elimina del controlador de PD. De esta forma se reducen significativamente los errores en el seguimiento de la trayectoria.

10.1.3 Control del Robot Basado en Dinámica Inversa

Al estudiar el controlador PD con compensación de gravedad, investigamos el modelo dinámico del robot para mejorar la eficiencia del método de control. Con el método de control basado en la dinámica inversa, este concepto se actualizará aún más.

A partir de las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de un manipulador de robot de dos segmentos (5.56), podemos observar claramente que el modelo de robot no es lineal. Por lo tanto, un controlador lineal, como el controlador PD, no es la mejor opción.

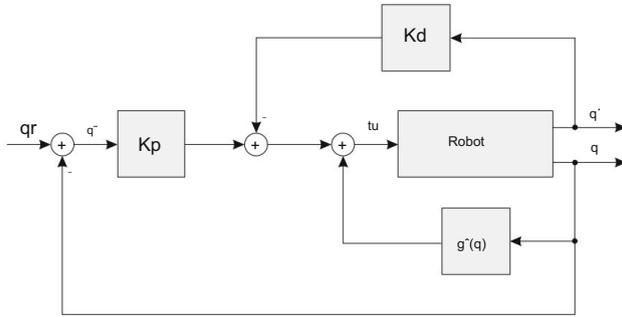


Fig. 10.4 Control de PD con compensación de gravedad

Derivaremos el nuevo esquema de control del modelo dinámico del robot descrito por la ecuación (10.5). Supongamos que los pares τ , generados por los motores, son iguales a las salidas de control u . La ecuación (10.5) se puede reescribir

$$B(q)q'' + C(q, q')q' + Fvq' + g(q) = u. \quad (10.8)$$

En el siguiente paso determinaremos el modelo dinámico del robot directo, que describe movimientos del robot bajo la influencia de los pares de torsión dados. Primero expresamos la aceleración q'' de la ecuación. (10.8)

$$q'' = \text{segundo}^{-1} (q)(u - (C(q, q')q' + Fvq' + g(q))). \quad (10.9)$$

Al integrar la aceleración, teniendo en cuenta el valor de la velocidad inicial, se obtiene la velocidad de movimiento del robot. Integrando la velocidad, tomando en cuenta la posición inicial, calculamos las posiciones reales en las articulaciones del robot. El modelo dinámico directo de un mecanismo de robot se muestra en la figura 10.5.

Para simplificar las ecuaciones dinámicas, definiremos una nueva variable $n(q, q')$, que comprende todos los componentes dinámicos excepto el componente inercial

$$n(q, q') = C(q, q')q' + Fvq' + g(q). \quad (10.10)$$

El modelo dinámico del robot se puede describir con la siguiente ecuación más corta

$$B(q)q'' + n(q, q') = \tau. \quad (10.11)$$

De la misma manera la Ec. (10.9) también se puede escribir en una forma más corta

$$q'' = \text{segundo}^{-1} (q)(u - n(q, q')). \quad (10.12)$$

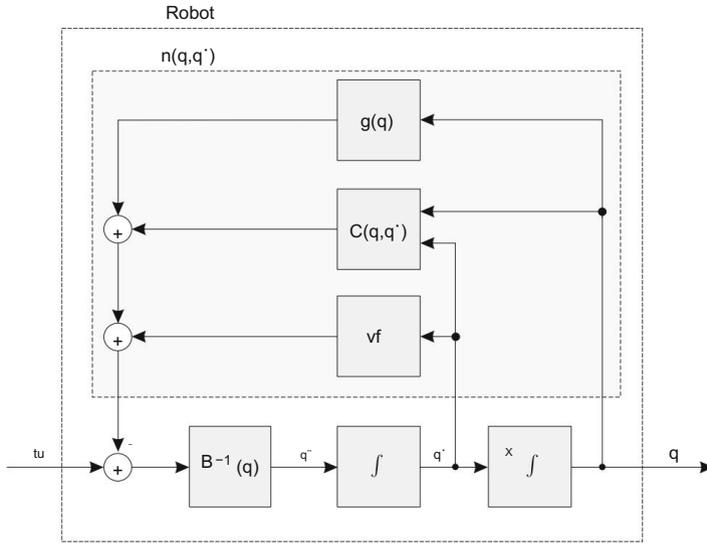


Fig. 10.5 El modelo dinámico directo de un mecanismo de robot

Supongamos que se conoce el modelo dinámico del robot. La matriz inercial $\hat{B}(q)$ es una aproximación de los valores reales $B(q)$, mientras que $\hat{n}(q, \dot{q})$ representa una aproximación de $n(q, \dot{q})$, como sigue

$$\hat{n}(q, \dot{q}) = \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{F}v\dot{q} + \hat{g}(q). \quad (10.13)$$

La salida del controlador u está determinada por la siguiente ecuación

$$u = \hat{B}^*(q)y + \hat{n}(q, \dot{q}), \quad (10.14)$$

donde se utilizó el modelo dinámico inverso aproximado del robot. El sistema, combinando las Ecs. (10.12) y (10.14), se muestra en la figura 10.6.

Supongamos la equivalencia $\hat{B}^*(q) = B(q)$ y $\hat{n}(q, \dot{q}) = n(q, \dot{q})$. En la figura 10.6 observamos que las señales $\hat{n}(q, \dot{q})$ y $n(q, \dot{q})$ se restan, ya que una se presenta con signo positivo y la otra con signo negativo. De manera similar, el producto de las matrices $\hat{B}^*(q)$ y B

$^{-1}(q)$ da como resultado una matriz unitaria, que puede omitirse. El sistema simplificado se muestra en la Fig. 10.7. Al implementar la dinámica inversa (10.14), el sistema de control se linealiza, ya que solo hay dos integradores entre la entrada y la salida q . El sistema no solo es lineal, sino que también está desacoplado (por ejemplo, el primer elemento del vector y solo influye en el primer elemento del vector de posición q).

De la figura 10.7 tampoco es difícil darse cuenta de que la variable y tiene las características de aceleración, por lo tanto

$$y = \ddot{q}. \quad (10.15)$$

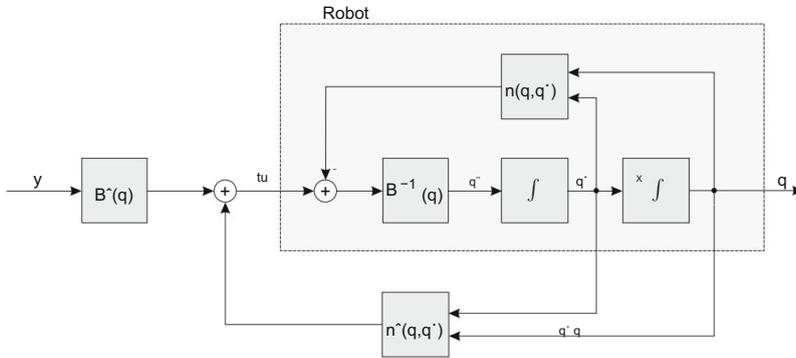


Fig. 10.6 Linealización del sistema de control implementando el modelo dinámico inverso

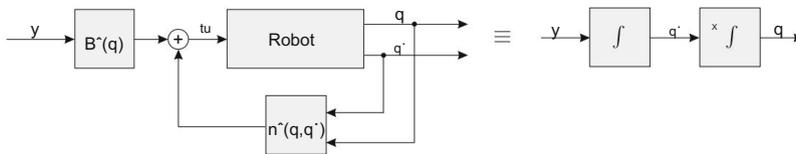


Fig. 10.7 El sistema linealizado

En un caso ideal, bastaría con determinar las aceleraciones articulares deseadas como las segundas derivadas de las posiciones articulares deseadas y el sistema de control seguirá las trayectorias articulares prescritas. Como nunca tenemos un modelo dinámico completamente preciso del robot, siempre se producirá una diferencia entre las posiciones de las articulaciones deseadas y las reales, y aumentará con el tiempo. El error de posición está definido por

$$\ddot{q}^- = \ddot{q}^r - \ddot{q}, \quad (10.16)$$

donde \ddot{q}^r representa la posición deseada del robot. De manera similar, el error de velocidad también se puede definir como la diferencia entre la velocidad deseada y la real.

$$\dot{q}^- = \dot{q}^r - \dot{q}. \quad (10.17)$$

El vector y , que tiene las características de aceleración, se puede escribir ahora como

$$y = \ddot{q}^r + K_p(\ddot{q}^r - \ddot{q}) + K_d(\dot{q}^r - \dot{q}). \quad (10.18)$$

Consta de la aceleración de referencia \ddot{q}^r y dos señales contribuyentes que dependen de los errores de posición y velocidad. Estas dos señales suprimen el error que surge debido a la dinámica imperfectamente modelada. El esquema de control completo se muestra en la Fig.

10.8.

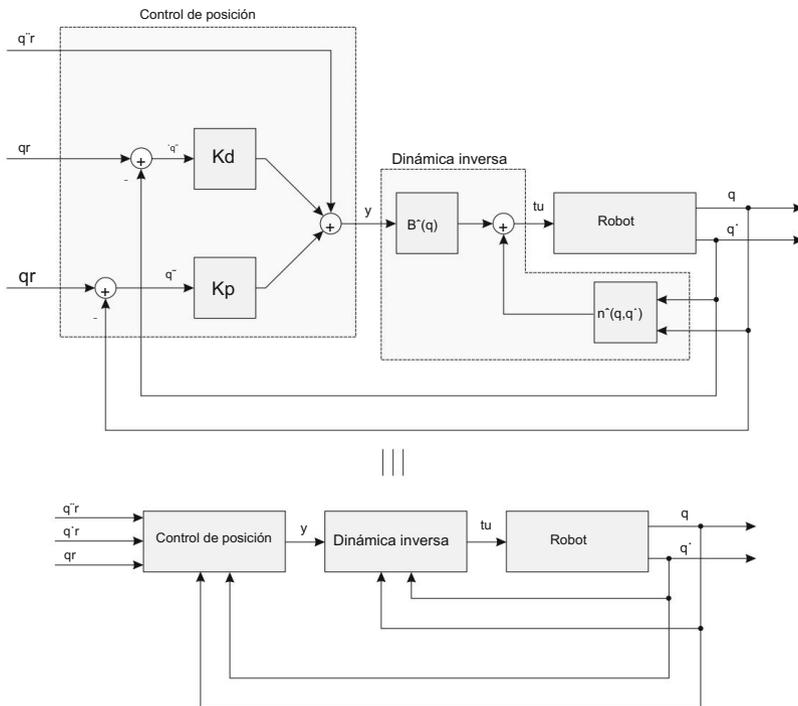


Fig. 10.8 Control del robot basado en dinámica inversa

Al considerar la Ec. (10.18) y la igualdad $y = \ddot{q}$, la ecuación diferencial que describe la dinámica del robot se puede escribir como

$$\ddot{q} + K_d \dot{q} + K_p q = 0, \quad (10.19)$$

donde se introdujo el error de aceleración $\ddot{q} = \ddot{q}^r - \ddot{q}$. La ecuación diferencial. (10.19) describe la dependencia del tiempo del error de control cuando se aproxima a cero. La dinámica de la respuesta está determinada por las ganancias K_p y K_d .

10.2 Control del Robot en Coordenadas Externas

Todos los esquemas de control estudiados hasta ahora se basaban en el control de las coordenadas internas (es decir, posiciones conjuntas). Las posiciones, velocidades y aceleraciones deseadas fueron determinadas por las variables articulares del robot. Por lo general, estamos más interesados en el movimiento del efector final del robot que en los desplazamientos de las articulaciones del robot en particular. En la punta del robot, se adjuntan diferentes herramientas para realizar diversas tareas del robot. En el texto adicional nos centraremos en el control del robot en las coordenadas externas.

10.2.1 Control basado en la matriz jacobiana transpuesta

El método de control se basa en la ya conocida Ec. (5.18), conectando las fuerzas que actúan en el efector final del robot con los pares de torsión de la articulación. La relación se define mediante el uso de la matriz jacobiana transpuesta

$$\tau = J^T(q)f, \quad (10.20)$$

donde el vector τ representa los pares de articulación y f es la fuerza en el punto final del robot.

Nuestro objetivo es controlar la pose del efector final del robot, donde su pose deseada está definida por el vector x_r y la pose real está dada por el vector x . Los vectores x_r y x en general comprenden seis variables, tres que determinan la posición del punto final del robot y tres para la orientación del efector final, por lo que $x = xyz \quad \psi^T$.

Los robots no suelen estar equipados con sensores que evalúen la pose del efector final; Los sensores del robot miden las variables articulares. Por lo tanto, la pose del efector final del robot debe determinarse utilizando las ecuaciones del modelo cinemático directo $\dot{x} = k(q)$, presentado en el capítulo sobre cinemática del robot (5.4). El error de posición del efector final del robot se calcula como

$$\tilde{x} = x_r - x = x_r - k(q). \quad (10.21)$$

El error de posición debe reducirse a cero. Un sistema de control proporcional simple con la matriz de ganancia K_p se introduce

$$f = K_p \tilde{x}. \quad (10.22)$$

Al analizar la Ec. (10.22) más de cerca, encontramos que nos recuerda la ecuación que describe el comportamiento de un resorte (en coordenadas externas), donde la fuerza es proporcional al alargamiento del resorte. Esta consideración nos ayuda a explicar el principio de control introducido. Imaginemos que hay seis resortes unidos virtualmente al efector final del robot, un resorte para cada grado de libertad (tres para la posición y tres para la orientación). Cuando el robot se aleja de la posición deseada, los resortes se alargan y tiran del efector final del robot a la posición deseada con una fuerza proporcional al error de posición. Por lo tanto, la fuerza f empuja el efector final del robot hacia la posición deseada. Como el desplazamiento del robot solo puede ser producido por los motores en las articulaciones, las variables que controlan los motores deben calcularse a partir de la fuerza f . Este cálculo se realiza con la ayuda de la matriz jacobiana transpuesta como se muestra en la ecuación. (10.20)

$$u = J^T(q) f. \quad (10.23)$$

El vector u representa los pares de unión deseados. El método de control basado en la matriz jacobiana transpuesta se muestra en la figura 10.9.

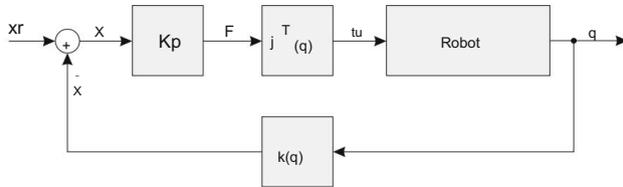


Fig. 10.9 Control basado en la matriz jacobiana transpuesta

10.2.2 Control basado en la matriz jacobiana inversa

El método de control se basa en la relación entre las velocidades de las articulaciones y las velocidades del punto final del robot (5.10), que viene dada por la matriz jacobiana. En la ecuación. (5.10) enfatizamos las derivadas temporales de las coordenadas externas x y las coordenadas internas q

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad \frac{dx}{dt} = J(q) \frac{dq}{dt} \quad (10.24)$$

Como dt aparece en el denominador a ambos lados de la Ec. (10.24), se puede omitir.

De esta forma obtenemos la relación entre cambios de coordenadas internas y cambios de pose del punto final del robot.

$$dx = J(q)dq \quad (10.25)$$

La ecuación (10.25) es válida solo para pequeños desplazamientos.

Al igual que con el método de control estudiado anteriormente, basado en la matriz jacobiana transpuesta, también podemos en este caso calcular primero el error de la pose del punto final del robot utilizando la ecuación. (10.21). Cuando el error en la pose es pequeño, podemos calcular el error posicional en las coordenadas internas por la relación inversa (10.25)

$$\tilde{q} = J^{-1}(q)\tilde{x} \quad (10.26)$$

De esta forma el método de control se traduce al conocido método de control de robots en las coordenadas internas. En el ejemplo más simple, basado en el controlador proporcional, podemos escribir

$$u = Kpq \quad (10.27)$$

La ecuación describe el comportamiento de un resorte (en coordenadas internas). El método de control, basado en la matriz jacobiana inversa, se muestra en la figura 10.10.

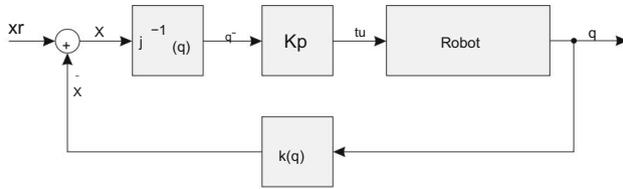


Fig. 10.10 Control basado en la matriz jacobiana inversa

10.2.3 PD Control de Posición con Compensación por Gravedad

El control de posición PD con compensación de gravedad ya fue estudiado en detalle para las coordenadas internas. Ahora derivaremos el algoritmo de control analógico en las coordenadas externas. El punto de partida será la Ec. (10.21), expresando el error de la pose del efector final. La velocidad del punto final del robot se calcula con la ayuda de la matriz jacobiana de las velocidades conjuntas

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (10.28)$$

La ecuación que describe el controlador PD en coordenadas externas es análoga a la escrita en las coordenadas internas (10.2)

$$f = Kp\tilde{x} - Kd\dot{x}. \quad (10.29)$$

En la ecuación. (10.29), el error de pose se multiplica por la matriz de las ganancias posicionales Kp , mientras que el error de velocidad se multiplica por la matriz Kd . El signo negativo de la el error de velocidad introduce amortiguamiento en el sistema. Los pares de torsión se calculan de la fuerza f , que actúa en la punta del robot, con la ayuda del jacobiano transpuesto matriz (de manera similar a la Ec. (10.23)) y sumando el componente que compensa gravedad (como en la ecuación (10.7)). El algoritmo de control se escribe como

$$\tau = J^T(q)f + g(q). \quad (10.30)$$

El esquema de control completo se muestra en la Fig. 10.11.

10.2.4 Control del Robot Basado en Dinámica Inversa

En el capítulo sobre el control de robots en las coordenadas internas, se presenta lo siguiente Se introdujo un controlador basado en dinámica inversa.

$$u = B^{-1}(q)y + n(q, \dot{q}). \quad (10.31)$$

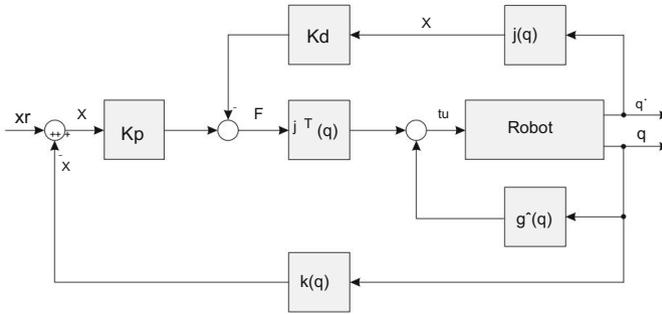


Fig. 10.11 Control de PD con compensación de gravedad en coordenadas externas

También aprendimos que el vector y tiene las características de aceleración

$$y = \ddot{q}, \quad (10.32)$$

que se determinó de tal manera que el robot siguió la trayectoria deseada expresada en las coordenadas internas. Como nuestro objetivo es desarrollar un método de control en las coordenadas externas, la señal y debe adaptarse adecuadamente. Ecuación (10.31), linealizando el sistema, permanece sin cambios.

Partiremos de nuevo de la ecuación que relaciona las velocidades de las articulaciones con el robot velocidades del efector final

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (10.33)$$

Calculando la derivada temporal de la Ec. (10.33), obtenemos

$$\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}. \quad (10.34)$$

El error de la pose del efector final del robot se determina como la diferencia entre su deseada y su pose real

$$\tilde{x} = x_r - x = x_r - k(q). \quad (10.35)$$

De manera similar, se determina el error de velocidad del efector final del robot.

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x}_r - \dot{x} = \dot{x}_r - J(q)\dot{q}. \quad (10.36)$$

El error de aceleración es la diferencia entre la aceleración deseada y la real

$$\ddot{\tilde{x}} = \ddot{x}_r - \ddot{x}. \quad (10.37)$$

Al desarrollar el controlador basado en dinámica inversa en las coordenadas internas, ecuación (10.19) se derivó describiendo la dinámica del error de control en la forma

$\ddot{q} + K_d \dot{q} + K_p q = 0$. Se puede escribir una ecuación análoga para el error de la pose del efector final. A partir de esta ecuación se puede expresar la aceleración \ddot{x} del efector final del robot

$$\ddot{x} + K_d \dot{x} + K_p x = 0 \quad \ddot{x} = \ddot{x}^r + K_d \dot{x} + K_p x. \quad (10.38)$$

De la ecuación. (10.34) expresamos \ddot{q} teniendo en cuenta la igualdad $y = \ddot{q}$

$$y = j^{-1}(q) \ddot{x} - J'(q, \dot{q}) \dot{q}. \quad (10.39)$$

Reemplazando \ddot{x} en la Ec. (10.39) con la expresión (10.38), se obtiene el algoritmo de control basado en dinámica inversa en las coordenadas externas

$$y = j^{-1}(q) \ddot{x}^r + K_d \dot{x} + K_p x - J'(q, \dot{q}) \dot{q}. \quad (10.40)$$

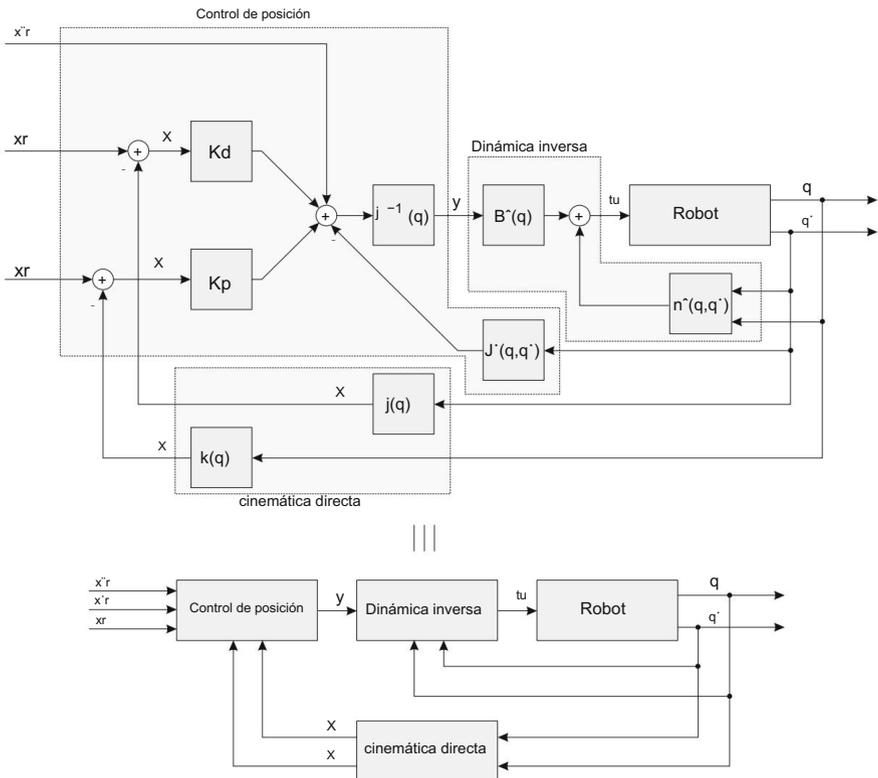


Fig. 10.12 Control de robot basado en dinámica inversa en coordenadas externas

El esquema de control que abarca la linealización del sistema basado en la dinámica inversa (10.31) y el control de lazo cerrado (10.40) se muestra en la figura 10.12.

10.3 Control de la Fuerza de Contacto

El control de posición es suficiente cuando un robot manipulador sigue una trayectoria en el espacio libre. Cuando se produce contacto entre el efector final del robot y el entorno, el control de posición no es un enfoque adecuado. Imaginemos un robot manipulador limpiando una ventana con una esponja. Como la esponja es muy flexible, es posible controlar la fuerza entre el robot y la ventana controlando la posición entre la pinza del robot y la ventana. Si la esponja se adapta lo suficiente y conocemos la posición de la ventana con suficiente precisión, el robot realizará la tarea de manera adecuada.

Si la adaptabilidad de la herramienta del robot o su entorno es menor, entonces no es tan sencillo ejecutar las tareas que requieren contacto entre el robot y su entorno. Imaginemos ahora un robot que raspa pintura de una superficie vidriosa mientras usa una herramienta rígida. Cualquier incertidumbre en la posición de la superficie de vidrio o mal funcionamiento del sistema de control del robot impedirá la ejecución satisfactoria de la tarea; o el cristal se romperá o el robot se agitará inútilmente en el aire.

En ambas tareas del robot, es decir, limpiar una ventana o raspar una superficie lisa, es más razonable que en lugar de la posición de la superficie de vidrio determinemos la fuerza que el robot debe ejercer sobre el entorno. La mayoría de los robots industriales modernos realizan tareas relativamente sencillas, como soldadura por puntos, pintura en aerosol y varias operaciones punto a punto. Sin embargo, varias aplicaciones robóticas requieren el control de la fuerza de contacto. Un ejemplo característico es el rectificado o una tarea similar de mecanizado con robot. Un área importante de la robótica industrial es también el ensamblaje de robots, en el que se deben ensamblar varios componentes. En tales tareas de robots, la detección y el control de las fuerzas es de suma importancia.

Se requiere una operación precisa de un manipulador de robot en un entorno incierto, no estructurado y cambiante para un uso eficiente de los robots en una tarea de ensamblaje. En este caso, varios componentes deben unirse con gran precisión. La medición y el control de las fuerzas de contacto permiten alcanzar la precisión posicional requerida del manipulador robótico. Dado que se utilizan medidas relativas en el control de la fuerza del robot, los errores absolutos en el posicionamiento del manipulador o del objeto no son tan críticos como en el control de la posición del robot. Cuando se trata de objetos rígidos, ya pequeños cambios en la posición producen grandes fuerzas de contacto. La medición y el control de esas fuerzas pueden conducir a una precisión posicional significativamente mayor del movimiento del robot.

Cuando un robot ejerce fuerza sobre el entorno, nos enfrentamos a dos tipos de tareas de robot. En el primer caso, nos gustaría que el efector final del robot adoptara la posición deseada mientras el robot está en contacto con el entorno. Este es el caso del montaje de robots. Un ejemplo característico es el de insertar una clavija en un agujero. El movimiento del robot debe ser de tal naturaleza que la fuerza de contacto se reduzca a cero o a un valor mínimo permitido. En el segundo tipo de tarea del robot, requerimos del robot

efector final para ejercer una fuerza predeterminada sobre el medio ambiente. Este es el ejemplo del robotizado. Aquí, el movimiento del robot depende de la diferencia entre la fuerza de contacto deseada y la medida real.

El método de control de la fuerza del robot se basará en el control del robot mediante dinámica inversa. Debido a la interacción del robot con el entorno, aparece un componente adicional, que representa la fuerza de contacto f , en el modelo dinámico inverso.

Como las fuerzas que actúan en el efector final del robot se transforman en pares de torsión mediante el uso de la matriz jacobiana transpuesta (5.18), podemos escribir el modelo dinámico del robot de la siguiente forma

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Fv\dot{q} + g(q) = \tau - J^T(q) f. \quad (10.41)$$

En el lado derecho de la Ec. (10.5) sumamos la componente $-J^T(q)f$ que representa la interacción con el entorno. Puede verse que la fuerza f actúa a través de la matriz jacobiana transpuesta de manera similar a los pares de torsión de las articulaciones (es decir, trata de producir el movimiento del robot). El modelo (10.41) se puede reescribir en una forma más corta introduciendo

$$n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + Fv\dot{q} + g(q), \quad (10.42)$$

lo que nos da el siguiente modelo dinámico de un robot en contacto con su entorno

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = \tau - J^T(q) f. \quad (10.43)$$

10.3.1 Linealización de un sistema de robot mediante dinámica inversa

Denotemos la salida de control, que representa los pares de accionamiento deseados en las articulaciones del robot, por el vector u . La ecuación (10.43) se puede escribir de la siguiente manera

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) + J^T(q)f = u. \quad (10.44)$$

De la ecuación (10.44) expresamos el modelo dinámico directo

$$\ddot{q} = \text{segundo}^{-1}(q) (u - n(q, \dot{q}) - J^T(q)f). \quad (10.45)$$

La ecuación (10.45) describe la respuesta del sistema de robot a la entrada de control u .

Al integrar la aceleración, teniendo en cuenta el valor de la velocidad inicial, se obtiene la velocidad real del movimiento del robot. Al integrar la velocidad, teniendo en cuenta la posición inicial, calculamos las posiciones reales en las articulaciones del robot. El modelo descrito está representado por el bloque Robot en la Fig. 10.13.

De manera similar a cuando desarrollamos el método de control basado en dinámica inversa, linealizaremos el sistema incluyendo el modelo dinámico inverso en el lazo cerrado.

$$u = B^{-1}(q)\ddot{y} + n^{-1}(q, \dot{q}) + J^{-T}(q)f, \quad (10.46)$$

El uso de acento circunflejo denota los parámetros estimados del sistema de robot. La diferencia entre las Ecs. (10.46) y (10.14), que representan el control basado en dinámica inversa en coordenadas internas, es la componente $J^{-T}(q)f$, compensando la influencia de fuerzas externas sobre el mecanismo del robot. El esquema de control, combinando las Ecs. (10.45) y (10.46), se muestra en la figura 10.13. Suponiendo que los parámetros estimados son iguales a los parámetros reales del robot, se puede observar que al introducir el lazo cerrado (10.46), el sistema se linealiza porque solo hay dos integradores entre la entrada y la salida q , como ya se ha dicho. demostrado en la figura 10.7.

10.3.2 Control de fuerza

Después de linealizar el sistema de control, se debe determinar el vector de entrada y. El control de la fuerza se traducirá al control de la pose del efector final. Esto se puede explicar, de forma simplificada, con el siguiente razonamiento: si deseamos que el robot aumente la fuerza que ejerce sobre el entorno, el efector final del robot debe ser desplazado en la dirección de la acción de la fuerza. Ahora podemos usar el sistema de control que fue desarrollado para controlar el robot en las coordenadas externas (10.40).

El esquema de control del efector final del robot, incluida la linealización, teniendo en cuenta la fuerza de contacto, se muestra en la Fig. 10.14.

Hasta este punto hemos resumido principalmente el conocimiento del control de pose del efector final del robot como se explica en los capítulos anteriores. En el siguiente paso, determinaremos la pose, la velocidad y la aceleración deseadas del efector final del robot, sobre la base de la fuerza medida entre el punto final del robot y su entorno.

Supongamos que deseamos controlar una fuerza deseada constante f_r . Con el sensor de muñeca de fuerza, se mide la fuerza de contacto f . La diferencia entre la fuerza deseada y la medida representa el error de fuerza

$$\tilde{f} = f_r - f. \quad (10.47)$$

El movimiento deseado del robot se calculará con base en la suposición de que la fuerza \tilde{f} debe desplazar un objeto virtual con inercia B_c y amortiguamiento F_c . En nuestro caso, el objeto virtual es, de hecho, el efector final del robot. Para facilitar la comprensión, consideremos un sistema con un solo grado de libertad. Cuando una fuerza actúa sobre dicho sistema, se iniciará un movimiento acelerado. El movimiento estará determinado por la fuerza, la masa del objeto y el amortiguamiento. Por lo tanto, el efector final del robot se comporta como un sistema compuesto por una masa y un amortiguador, que están bajo la influencia del

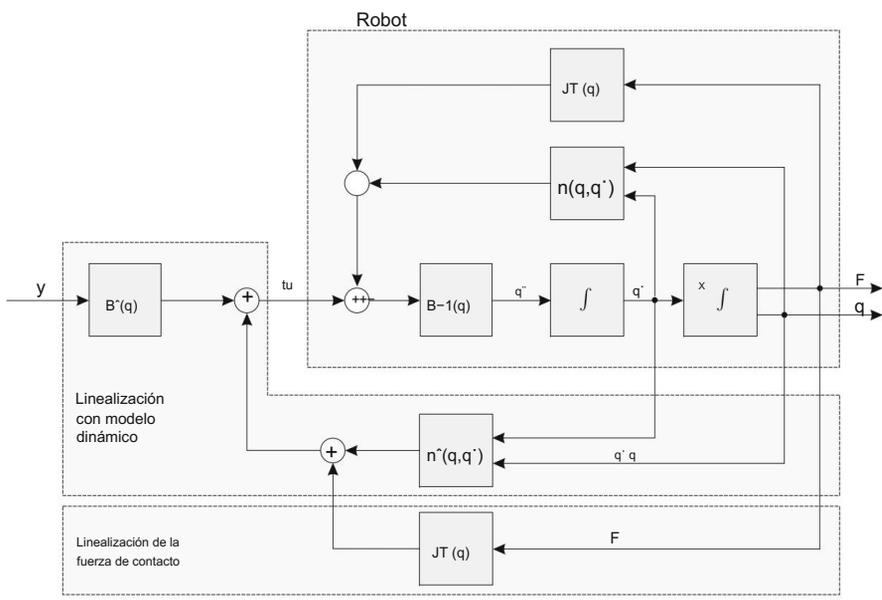


Fig. 10.13 Linealización del sistema de control implementando el modelo dinámico inverso y la fuerza de contacto medida

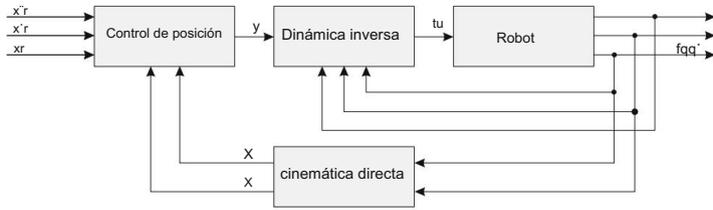


Fig. 10.14 Control de robot basado en dinámica inversa en coordenadas externas incluyendo la fuerza de contacto

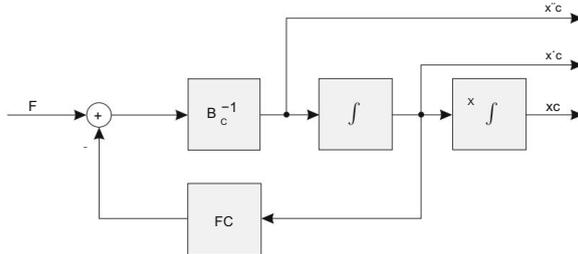


Fig. 10.15 Control de fuerza traducido al control de la pose del efector final del robot

fuerza \tilde{f} . Para más grados de libertad podemos escribir la siguiente ecuación diferencial que describe el movimiento del objeto

$$\tilde{f} = B_c \ddot{x}^c + F_c \dot{x}^c. \quad (10.48)$$

Las matrices B_c y F_c determinan el movimiento del objeto bajo la influencia de la fuerza \tilde{f} . De la ecuación. (10.48) la aceleración del objeto virtual se puede calcular

$$\ddot{x}^c = B_c^{-1} (\tilde{f} - F_c \dot{x}^c). \quad (10.49)$$

Integrando la Ec. (10.49), se calculan las velocidades y la pose del objeto, como se muestra en la figura 10.15. De esta forma, la posición de referencia x^c , la velocidad de referencia \dot{x}^c y la aceleración de referencia \ddot{x}^c se determinan a partir del error de fuerza. Las variables calculadas son entradas al sistema de control, que se muestra en la Fig. 10.14. De esta forma el control de fuerza se traducía en el ya conocido control de robot en coordenadas externas.

Para controlar también simultáneamente la pose del efector final del robot, se incluye una composición paralela. La composición paralela supone que las variables de control de referencia se obtienen sumando las referencias para el control de fuerza ($x^c, \dot{x}^c, \ddot{x}^c$) y las referencias para el control de pose ($x^d, \dot{x}^d, \ddot{x}^d$). La composición paralela se define mediante ecuaciones

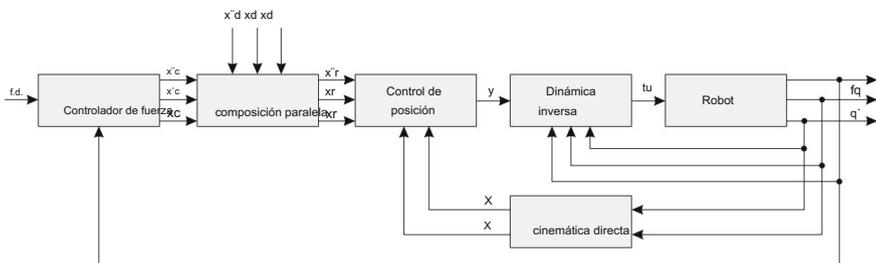


Fig. 10.16 Control directo de fuerza en las coordenadas externas

$$\begin{aligned}
 xr &= xd + xc \\
 \dot{x}r &= \dot{x}d + \dot{x}c \\
 \ddot{x}r &= \ddot{x}d + \ddot{x}c
 \end{aligned}
 \tag{10.50}$$

El sistema de control que incorpora el control de la fuerza de contacto, la composición paralela y el control del robot basado en dinámica inversa en coordenadas externas se muestra en la Fig. 10.16. El control de la fuerza se obtiene seleccionando

$$\begin{aligned}
 xr &= xc \\
 \dot{x}r &= \dot{x}c \\
 \ddot{x}r &= \ddot{x}c
 \end{aligned}
 \tag{10.51}$$

El método de control descrito permite el control de la fuerza. Sin embargo, no permite el control independiente de la pose del efector final del robot, ya que está determinado por el error en la señal de fuerza.

Capítulo 11

Entorno robótico



Este capítulo ilustrará entornos de robots, ejemplificados por procesos de ensamblaje de productos donde los robots son parte de una línea de producción o como unidades completamente independientes. El ejemplo también se puede replicar fácilmente en otras tareas, como inspección y prueba de productos, soldadura, pintura, operaciones de recogida y colocación, etc.

De hecho, los robots representan una solución ideal para muchos problemas de seguridad y salud industrial, principalmente porque son capaces de realizar tareas duras y fatigosas en un entorno peligroso. Los robots de soldadura y pintura permiten a los trabajadores humanos evitar humos y vapores tóxicos. Los robots también cargan prensas eléctricas, que en el pasado eran causas frecuentes de lesiones a los trabajadores. Los robots trabajan en fundiciones y entornos radiactivos. Sin embargo, con el número cada vez mayor de robots en los procesos industriales, existe un mayor peligro introducido por los propios robots. Por lo tanto, considerar la seguridad es de suma importancia al diseñar una celda de trabajo robótica.

11.1 Seguridad de los robots

Los robots industriales son dispositivos fuertes que se mueven rápidamente en su espacio de trabajo. En la mayoría de los casos, un accidente ocurre solo cuando un trabajador humano ingresa al espacio de trabajo del robot. Una persona se acerca al robot, ya sea accidentalmente o incluso sin saberlo, o con el objetivo de reprogramar o mantener el robot. A menudo es difícil para un operador humano juzgar cuál será el próximo movimiento del robot. Particularmente peligrosos son los movimientos inesperados del robot, que son la consecuencia de una falla del robot o de un error de programación. Muchas organizaciones gubernamentales y grandes empresas, junto con productores de robots, han desarrollado estándares de seguridad. Los enfoques que garantizan la cooperación segura de los trabajadores humanos y los robots industriales se pueden dividir en tres grupos principales: (1) características de seguridad del robot, (2) salvaguardas del espacio de trabajo del robot y (3) capacitación y supervisión del personal.

Los robots de hoy en día tienen funciones de seguridad en gran medida ya integradas para los tres modos de operación: trabajo normal, programación y mantenimiento. Las funciones para evitar fallas aumentan la confiabilidad y la seguridad del robot. Tal característica, por ejemplo, evita que el robot alcance la prensa antes de que esté abierta. Las características de seguridad integradas en la unidad de control del robot generalmente permiten la sincronización entre el robot y otras máquinas en el entorno del robot. La verificación de las señales, que indican cuándo un dispositivo está listo para tomar parte activa en la celda del robot, debe ser parte de la programación segura del robot. El uso de sensores fiables juega un papel importante a la hora de comprobar el estado de las máquinas en el área de trabajo del robot. Las características de seguridad importantes de cualquier sistema de robot también son el software y las paradas eléctricas.

Al programar o enseñar un robot, el operador humano debe estar en el área de trabajo del robot. En la fase de programación, la velocidad de los movimientos del robot debe ser considerablemente menor que durante el trabajo normal. La velocidad del robot debe reducirse a un valor tal que el operador humano pueda evitar movimientos inesperados del robot. La velocidad máxima recomendada del robot, cuando hay un trabajador humano dentro del espacio de trabajo, es de 0,25 m/s.

La unidad colgante de enseñanza puede ser un componente crítico en la operación segura del robot. Los errores de programación durante la enseñanza de un robot a menudo provocan movimientos inesperados del robot. El diseño de una unidad colgante de aprendizaje puede tener un impacto significativo en la operación segura. Se encontró que el uso del control de joystick es más seguro que el uso de botones de control. El tamaño de los pulsadores de emergencia también tiene una influencia importante en los tiempos de reacción del operador humano.

Las características especiales de seguridad facilitan el mantenimiento seguro del robot. Una característica de este tipo es, por ejemplo, la posibilidad de encender el sistema de control, mientras que el brazo del robot no está alimentado. Otra característica permite el movimiento manual pasivo de los segmentos del robot, mientras los actuadores del robot están apagados. Algunas funciones del robot hacen que el robot se detenga lo antes posible, mientras que otras permiten que el sistema de control ejecute el comando actual y se detenga después.

La mayoría de los accidentes de robots ocurren cuando las personas ingresan intencionalmente o sin cuidado al área de trabajo del robot. Las protecciones del espacio de trabajo del robot evitan dicha entrada en la celda del robot. Hay tres enfoques principales para la protección del espacio de trabajo del robot: (1) barreras y vallas, (2) detección de presencia y (3) señales, señales y luces de advertencia.

Por lo general, se utilizan barreras o cercas de metal para evitar que trabajadores no autorizados ingresen al área de trabajo del robot. El color de la cerca juega un papel importante, advirtiendo de manera eficiente al personal no informado. Las vallas también son una protección adecuada contra varios vehículos que se utilizan para el transporte de materiales en la nave de producción. También se debe prever la apertura segura de las puertas, que permiten la entrada al área cercada. Un operador humano solo puede ingresar después de apagar el sistema de robot usando un panel de control fuera de las barreras. Las barreras de protección bien diseñadas también pueden proteger a los transeúntes de los objetos que salen volando del alcance del robot.

Los dispositivos que detectan la presencia de una persona en el área de trabajo del robot proporcionan una protección importante. Estos pueden ser tapetes sensibles a la presión, cortinas de luz, sensores de efecto final, varios sensores de ultrasonido, capacitivos, infrarrojos o de microondas dentro de la celda del robot y visión por computadora. Las alfombrillas instrumentadas o las cortinas de luz pueden detectar la entrada de una persona en el área de trabajo del robot. En semejante

caso de que se active una señal de advertencia y se pueda detener el funcionamiento normal del robot. Los sensores del efector final detectan las colisiones inesperadas con objetos en el entorno del robot y provocan una parada de emergencia. Los sensores sin contacto y la visión por computadora detectan varias intrusiones en el área de trabajo del robot.

Las señales de advertencia, las señales y las luces pueden aumentar en gran medida el funcionamiento seguro de las células robóticas. Estas señales de advertencia alertan a los operadores de la presencia de una situación peligrosa. Los manuales de instrucciones y la capacitación adecuada también son importantes para el uso efectivo de las señales de advertencia. Dichos letreros son más efectivos con las personas que ingresan involuntariamente al área de trabajo del robot que con los operadores que están familiarizados con el funcionamiento de la celda del robot. Los operadores experimentados a menudo ignoran las advertencias e ingresan intencionalmente al espacio de trabajo del robot sin apagar el robot con el objetivo de ahorrar una pequeña cantidad de tiempo. Tales movimientos son a menudo causas de accidentes. Las falsas alarmas también pueden reducir la eficacia de las advertencias.

La selección de trabajadores calificados, la capacitación en seguridad y la supervisión adecuada son los requisitos previos para trabajar con seguridad con robots. Los momentos especialmente críticos son el arranque y el apagado de una célula robótica. Del mismo modo, el mantenimiento y la programación de robots pueden ser peligrosos. Algunas aplicaciones de los robots (por ejemplo, la soldadura) incluyen situaciones peligrosas específicas que los trabajadores deben conocer bien. Los empleados en el entorno de los robots deben satisfacer los requisitos tanto físicos como mentales para su trabajo. La selección de los trabajadores apropiados es un primer paso importante. El segundo paso, que es igualmente importante, es una amplia formación en seguridad. La seguridad satisfactoria solo se logra con la supervisión constante de los empleados. La formación adicional es un componente importante de la aplicación de los robots industriales. En los cursos de formación, los trabajadores deben familiarizarse con los posibles peligros y su gravedad. Deben aprender a identificar y evitar situaciones peligrosas. Los errores comunes que son causa de accidentes deben explicarse en detalle. Estos cursos de formación suelen prepararse con la ayuda de fabricantes de robots.

Se espera que los futuros robots no trabajen detrás de protecciones de seguridad con puertas cerradas o barreras de luz. En cambio, trabajarán en estrecha cooperación con los humanos, lo que lleva a la preocupación fundamental de cómo garantizar una interacción física segura entre humanos y robots. El mayor progreso se espera en el diseño de segmentos de robot ligeros y flexibles, juntas compatibles, actuadores novedosos y algoritmos de control avanzados.

La instalación del robot puede ser como una célula de robot individual o como parte de una línea de producción industrial más grande. Los robots industriales tienen control de posición y, a menudo, no tienen sensores para detectar su entorno. Por este motivo, los robots deben aislarse del entorno humano en caso de actividad indebida del robot o de sus piezas periféricas, para evitar lesiones humanas o colisiones con otros equipos en la celda de trabajo del robot. Es necesario definir el riesgo de seguridad de cada celda robótica individual para que se puedan tomar las precauciones adecuadas. El comportamiento inadecuado del robot puede ser el resultado de una falla del sistema del robot o un error humano, como por ejemplo:

- comportamiento impredecible del robot debido a una falla en el sistema de control,
- falla en la conexión del cable debido al movimiento del robot,
- error de transferencia de datos que produce un movimiento impredecible del robot,
- falla de la herramienta del robot, p. ej., pistola de soldar,

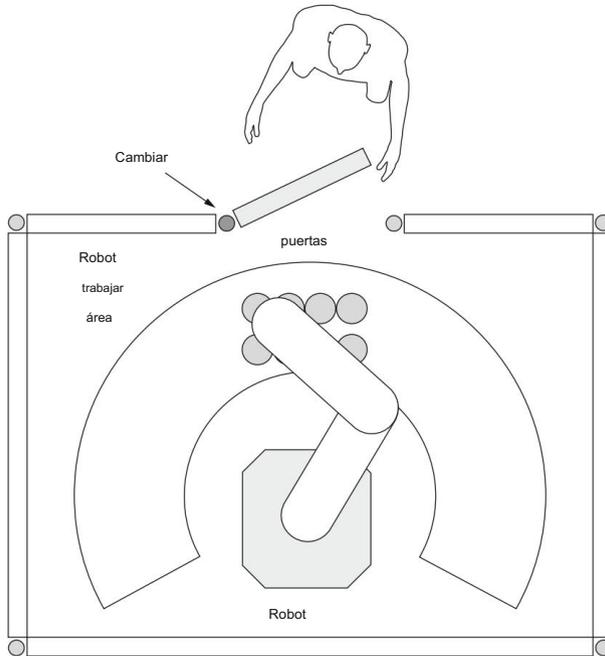


Fig. 11.1 Nivel 1: protección mecánica de la celda del robot

- errores de software, • componentes mecánicos del robot desgastados.

Los peligros potenciales de fallos del sistema derivados de estos errores pueden dividirse en tres categorías:

- El riesgo de colisión es la posibilidad de que el robot en movimiento o la herramienta acoplada al robot golpee al operador.
- El peligro de pinzamiento es una situación en la que el robot, durante el movimiento cerca de los objetos en la celda del robot (por ejemplo, mecanismos de transporte), aprieta al operador. • Otros peligros que son específicos de cada aplicación de robot, como el riesgo de descarga eléctrica, impacto del arco de soldadura, quemaduras, sustancias tóxicas, radiación, niveles de sonido excesivos.

Por todas estas razones, las demandas de seguridad de los robots se pueden dividir en tres niveles.

El nivel 1 es el nivel de protección de toda la célula robótica. Por lo general, se logra con protección física utilizando una combinación de cercas mecánicas, rejas y puertas (Fig. 11.1). Además de la protección física, también se puede instalar un sensor de presencia humana (por ejemplo, cortinas láser).

El nivel 2 incluye un nivel de protección mientras un operador está en el área de trabajo del robot. Normalmente, la protección se realiza mediante sensores de presencia. A diferencia del nivel anterior, que se basa principalmente en la protección mecánica, el nivel 2 se basa en la percepción de la presencia de los operadores (Fig. 11.2).

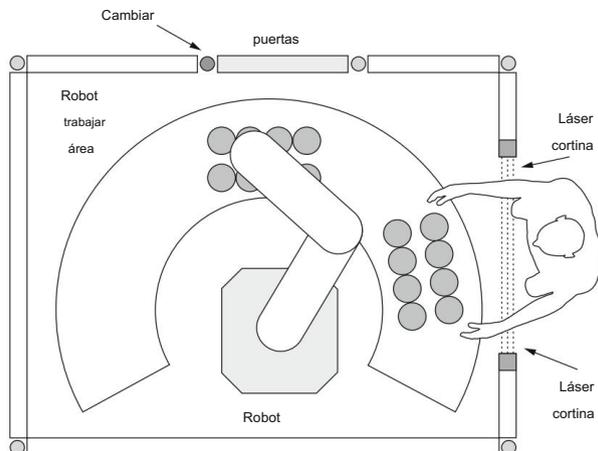


Fig. 11.2 Nivel 2: protección de celdas robóticas optoelectrónicas

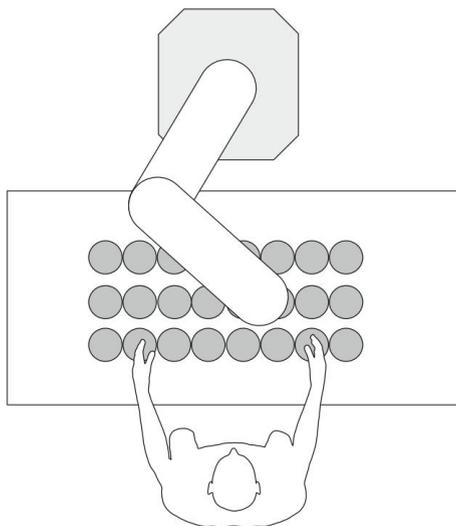


Fig. 11.3 Nivel 3: colaboración de humanos y robots

El nivel 3 es el nivel de protección en el que las personas están en contacto con el robot denominado robots colaborativos. La seguridad en este nivel se lleva a cabo detectando la presencia de un humano u obstáculos cerca del robot o cuando el robot y el humano están en colaboración (Fig. 11.3). En situaciones de riesgo, el sistema de robot debe reducir la velocidad o detenerse. Estos sistemas incorporan sensores para el seguimiento humano, varios sensores de fuerza y par y sensores de contacto o tacto. Los robots colaborativos se describen con más detalle en el Cap. 12

11.2 Periféricos robóticos en procesos de ensamblaje

Los sistemas de robot instalados en la industria suelen formar parte de líneas de producción dedicadas más grandes. Las líneas de producción se utilizan para la producción de alto volumen de piezas donde se necesitan múltiples operaciones de procesamiento. La línea de producción se divide en estaciones de trabajo donde trabajadores humanos, máquinas dedicadas o robots realizan las tareas necesarias. También se pueden incorporar otros periféricos para aumentar las capacidades de la línea de producción. Los periféricos seleccionados adecuadamente también aumentan la confiabilidad, flexibilidad y eficiencia del sistema.

11.2.1 Configuraciones de la línea de producción de ensamblaje

Las líneas de producción de ensamblaje en la industria consisten en cintas transportadoras, paletas que viajan con cintas transportadoras, sistemas de visión, cilindros neumáticos, diferentes sensores y robots o manipuladores. Las paletas proporcionan el medio para indexar, ubicar y rastrear las piezas fabricadas individuales que viajan a través del proceso de automatización. Los robots brindan flexibilidad y pueden integrarse en cualquiera de las configuraciones de la línea de producción. Las configuraciones más habituales de líneas de producción de montaje con asistencia de robot son:

- En línea (directa, en L, en U, circular, rectangular), • Rotativa, • Híbrida.

En la Fig. 11.4 se presenta un ejemplo de una línea de producción en línea circular. Las estaciones de trabajo de línea son atendidas por humanos, máquinas dedicadas y robots. Piezas para ensamblar

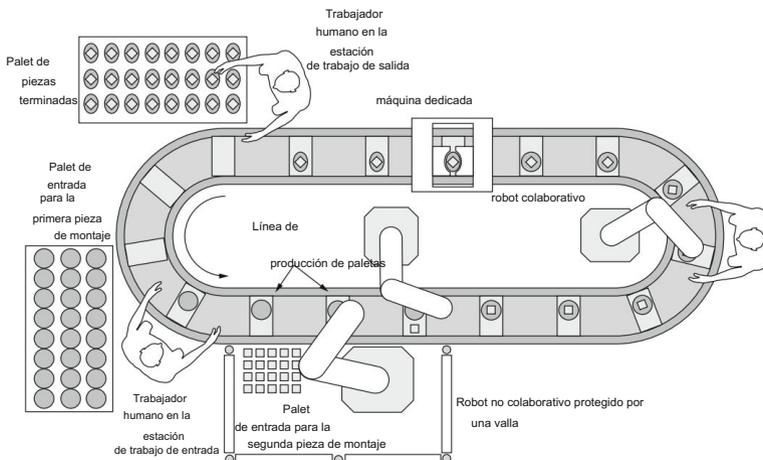


Fig. 11.4 Ejemplo de línea de producción de ensamblaje en línea circular con estaciones de trabajo humanas, mecánicas y robóticas

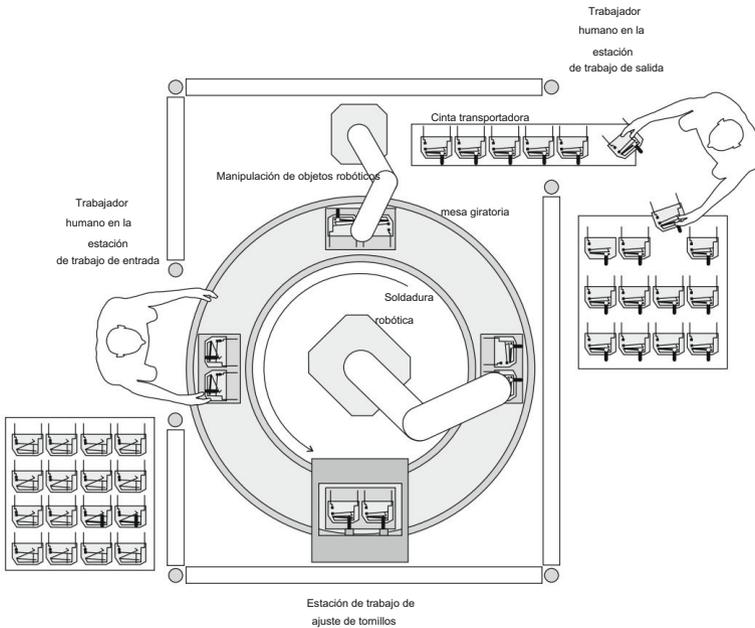


Fig. 11.5 Ejemplo de línea de producción de mesa giratoria con estaciones de trabajo de personas, máquinas y robots

bly se manipulan a mano o por el robot y se transfieren entre las estaciones de trabajo mediante palets a lo largo de una cinta transportadora. La distancia entre los palets no es necesariamente constante y su posición es monitoreada por sensores de ubicación, generalmente sensores de presencia capacitivos o inductivos. Estos sensores son necesarios para señalar a los robots o a una máquina dedicada que el palet está en la posición correcta y que se puede realizar la operación de la estación de trabajo. El tiempo de ciclo para transportar la pieza de una estación de trabajo a la siguiente suele ser constante, lo que hace que las estaciones de trabajo estén sincronizadas. En ciertos casos, los desarrolladores de la línea de producción integran piezas para amortiguar las palets, lo que hace que la línea de producción sea asíncrona. La necesidad de un búfer surge en los casos en que algunas estaciones de trabajo tienen tiempos de ciclo variables; con un búfer, el tiempo de ciclo total de la línea de producción no se ve afectado.

Otra configuración de línea de montaje muy común es una mesa giratoria o giratoria (figura 11.5), generalmente accionada por motores eléctricos. La velocidad y la repetibilidad del posicionamiento son altas. La mesa giratoria a menudo se denomina mesa de marcación o máquina de indexación. La ventaja de la configuración rotativa es que requiere menos espacio en el piso y, a menudo, es más económica que otras configuraciones de líneas de producción. La mesa giratoria siempre realiza una transferencia sincrónica de piezas entre estaciones de trabajo con un tiempo de ciclo constante.

Al igual que con el ejemplo anterior, esta configuración también puede ser atendida por humanos, robots o máquinas dedicadas. La mesa giratoria tiene forma circular en torno a la cual se desplazan los palets o portapiezas y se transportan las piezas, a su vez, en cada manual

o estación de trabajo automatizada donde se realizan las operaciones de producción. La mesa giratoria se puede dividir en varias estaciones de trabajo (mínimo 2), haciendo que el ángulo de rotación sea de 90° .

Más comunes son las mesas giratorias con más de 2 estaciones de trabajo, por ejemplo, 4, 5, 6 estaciones de trabajo. El tamaño de la mesa giratoria se define por el tamaño de la pieza, el tamaño del equipo y el número de estaciones de trabajo de la línea de producción giratoria. También hay disponibles giradiscos controlados en circuito cerrado.

Por lo general, se instala una combinación de las configuraciones anteriores y se denomina configuración de línea de producción híbrida. Varios factores declaran la configuración general de la línea de producción, tales como:

- espacio necesario para la línea de producción,
- costo de instalación de la línea de producción,
- tiempo de ciclo de la línea de producción.

11.3 Dispositivos de alimentación

La tarea de los dispositivos de alimentación es llevar piezas o ensamblajes al robot o máquina dedicada de tal manera que se conozca la posición de la pieza. El funcionamiento fiable de los dispositivos de alimentación es de suma importancia en las celdas de robot sin visión de robot. La posición de una pieza debe ser precisa, ya que el efector final del robot siempre se mueve a lo largo de la misma trayectoria y se espera que la pieza esté siempre en el mismo lugar.

Los requisitos para los dispositivos de alimentación del robot son mucho más estrictos que en el montaje manual, a menos que la celda del robot esté equipada con un sistema de visión del robot. Los dispositivos de alimentación del robot no deben deformar las piezas, deben funcionar de forma fiable, posicionar las piezas con precisión, trabajar a una velocidad suficiente, requerir un tiempo mínimo de carga y contener un número suficiente de piezas.

El dispositivo de alimentación no debe causar ningún daño a las piezas manipuladas, ya que el robot insertaría las piezas dañadas en conjuntos que no pueden funcionar correctamente. El costo de dichos conjuntos dañados es más alto que el costo de un dispositivo de alimentación más confiable. El dispositivo de alimentación debe manipular de forma fiable todas las piezas cuyas dimensiones estén dentro de los límites de tolerancia. También debe ser lo suficientemente rápido para cumplir con los requisitos del tiempo de ciclo de toda la línea de producción y nunca debe ralentizar su funcionamiento. Además, el dispositivo de alimentación debería requerir el menor tiempo posible para cargar las piezas. Es más deseable llenar una gran cantidad de piezas en el dispositivo de alimentación a la vez que insertarlas manualmente una por una. Los dispositivos de alimentación deben contener el mayor número de piezas posible. De esta manera se reduce el número de cargas necesarias por día.

Los dispositivos de alimentación más simples son paletas y accesorios; un ejemplo cotidiano son los palets de cartón o de plástico que se utilizan para los huevos. Los palés almacenan las piezas, al mismo tiempo que determinan su posición y, en ocasiones, también su orientación. En una situación ideal, el mismo palé se usa para enviar las piezas del proveedor y para su uso posterior en la celda robótica del consumidor. Los palés se cargan automáticamente con una máquina o manualmente. Las piezas frágiles, los objetos flexibles o las piezas con formas extrañas deben cargarse manualmente. carga de

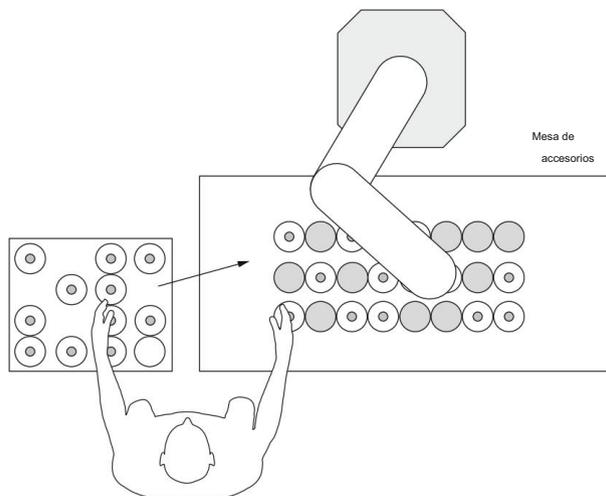


Fig. 11.6 Carga simultánea de una mesa de dispositivos

los palets representan el punto más débil del paletizado. Otra desventaja de los palés es su superficie bastante grande, que ocupa un área considerable en el espacio de trabajo del robot.

La forma más sencilla de llevar piezas a la celda del robot está representada por una tabla de accesorios. El operador humano toma una pieza de un contenedor, donde las piezas no están clasificadas, y la coloca en la mesa de accesorios dentro del espacio de trabajo del robot (Fig. 11.6). La mesa de fijación debe contener ranuras especiales que aseguren el posicionamiento fiable de una pieza en el espacio de trabajo del robot. Una mesa de fijación de este tipo se usa a menudo en soldaduras en las que las partes componentes también deben sujetarse a la mesa antes de que tenga lugar la soldadura robótica. El tiempo requerido para la soldadura robótica es considerablemente más largo que el de carga y descarga, lo que puede justificar el uso de una mesa de fijación.

Las tarimas se pueden cargar por adelantado en algún otro lugar y luego llevarlas a la celda del robot (Fig. 11.7). Esto evita un largo período de espera para el robot mientras el operador humano carga los palets. El trabajador humano solo debe llevar el palé al espacio de trabajo del robot y colocarlo correctamente utilizando pasadores especiales en la mesa de trabajo. Es importante que el palé contenga un número suficiente de piezas para permitir el funcionamiento continuo del robot. El intercambio de paletas en el espacio de trabajo del robot representa un problema de seguridad ya que el operador debe apagar el robot o la celda del robot debe equiparse con otras soluciones de seguridad (por ejemplo, mesa giratoria o robot colaborativo).

Se puede colocar una mayor cantidad de paletas en una mesa giratoria (Fig. 11.8). La mesa giratoria permite la carga de los palés por un lado, mientras que las actividades del robot se realizan en el otro lado de la mesa giratoria. De esta forma se reduce considerablemente la inactividad de la célula robótica y se protege al operador humano frente a los movimientos del robot.

En general, se utilizan tres tipos de palets: palets de plástico y metal formados al vacío o moldeados por inyección. Dado que el costo de las paletas formadas al vacío es bajo,

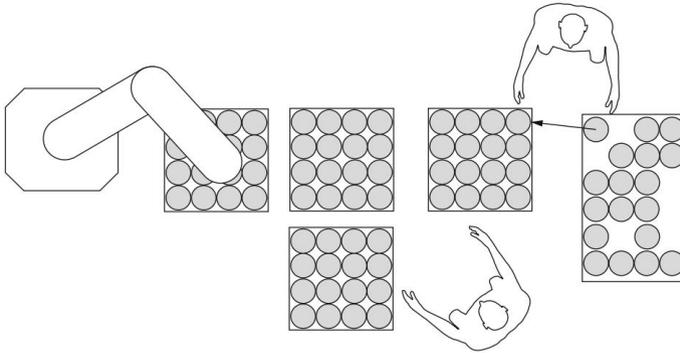


Fig. 11.7 Carga de los palés por adelantado

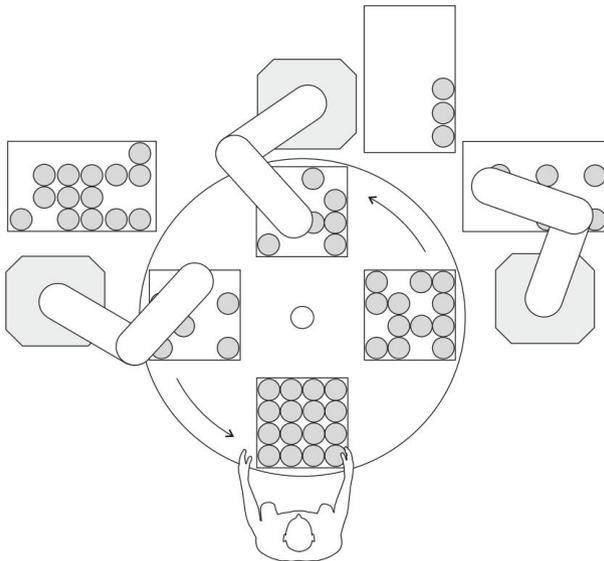


Fig. 11.8 Mesa giratoria con tarimas de paletas

se utilizan tanto para el embalaje y envío de las piezas como para su uso en la célula robótica. Se deben construir orificios de referencia en todas las paletas para que coincidan con los pasadores en la mesa de trabajo para permitir un posicionamiento simple y rápido. Como las paletas formadas al vacío son económicas, no es difícil comprender que no son las más precisas, confiables o duraderas. Están hechos de una lámina delgada de material plástico que se calienta y se forma al vacío sobre un molde. La imprecisión del palet es consecuencia de su baja rigidez. Las paletas de plástico moldeado por inyección se utilizan cuando se requieren paletas más precisas y duraderas. La producción del molde es bastante costosa, mientras que el costo de producción de un solo palé no es elevado. Debemos tener en cuenta que la mayoría de los palets de plástico moldeados y al vacío son inflamables. Los palets de metal son los únicos

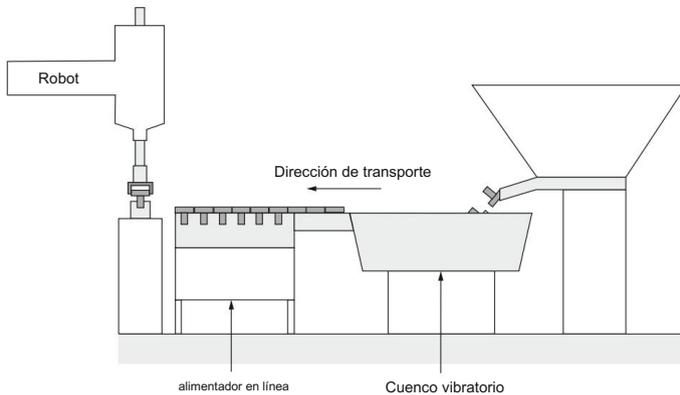


Fig. 11.9 Alimentador de cuenco vibratorio

que no son inflamables. Se producen mediante varios enfoques de mecanizado. Las tarimas metálicas son las más confiables y duraderas, mientras que su costo es mayor que las de tipo plástico. Por lo tanto, solo se utilizan dentro del proceso de ensamblaje del robot.

Los alimentadores de piezas representan otra familia interesante de dispositivos de alimentación que se utilizan no solo para almacenar piezas, sino también para posicionarlas e incluso orientarlas en la posición adecuada para el agarre del robot. Los más comunes son los alimentadores de cuenco vibratorio (Fig. 11.9). Aquí, las piezas se cargan desordenadamente en el recipiente. La vibración del tazón y el alimentador en línea es producida por un electroimán, y la vibración adecuada se obtiene al unir los alimentadores vibratorios a una gran masa, generalmente una mesa de acero gruesa. Las vibraciones hacen que las piezas salgan del recipiente. Las cercas en forma de espiral especialmente formadas los obligan a adoptar la orientación requerida. El mismo alimentador de tazones se puede usar para diferentes partes, pero no al mismo tiempo. Otro beneficio es que el recipiente puede contener una gran cantidad de piezas mientras ocupa solo un área pequeña en el espacio de trabajo del robot. Los comederos de tazones no son apropiados para piezas como objetos de goma blanda o resortes. Otra desventaja es el posible daño causado por las piezas que se atascan en el recipiente. El ruido de los alimentadores vibratorios también puede resultar molesto.

Un cargador simple consiste en un tubo que almacena las piezas y la placa deslizante, accionada neumática o eléctricamente, que saca las piezas una a una del cargador (Fig. 11.10). El cargador se carga manualmente, por lo que se conoce la orientación de las piezas. La gravedad empuja las piezas hacia la placa deslizante. El mecanismo de la placa deslizante debe diseñarse de tal manera que evite el atascamiento de las piezas, mientras que solo una sola pieza sale del alimentador a la vez. La placa deslizante debe bloquear todas las partes excepto la inferior.

Los alimentadores de revistas son excelentes soluciones para el manejo de circuitos integrados (Fig. 11.11). Los circuitos integrados ya se envían en tubos que se pueden utilizar con fines de alimentación. El alimentador de revistas para circuitos integrados generalmente consta de

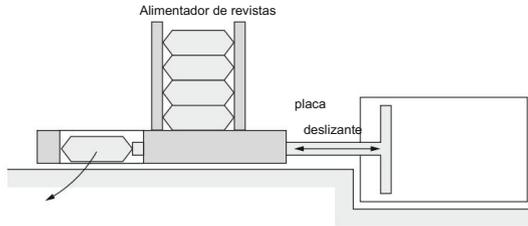


Fig. 11.10 Alimentador de revistas

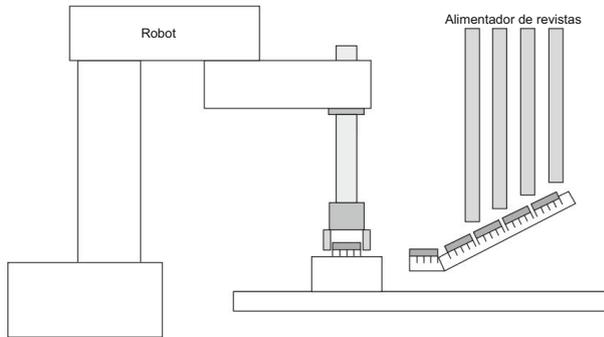


Fig. 11.11 Alimentador de cargador de circuito integrado

varios tubos. Los tubos se alinean a lo largo de un alimentador vibratorio en línea. La principal desventaja de los alimentadores de revistas es la carga manual. También son inapropiados para manejar objetos grandes.

11.4 Transportadores

Los transportadores se utilizan para el transporte de piezas, ensamblajes o palets entre las celdas de robot. El transportador más simple utiliza una cadena de plástico o metal que empuja las tarimas a lo largo de una guía de metal (Fig. 11.12). Un motor eléctrico impulsa la cadena con velocidad constante. La fuerza motriz está representada por la fricción entre la cadena y el palet. La paleta se detiene mediante pasadores especiales accionados por cilindros neumáticos. La cadena sigue deslizándose contra el fondo del palet. Cuando llega otro palet, es detenido por el primero. De esta forma se obtiene una cola de palets frente a la célula robotizada.

El giro de un transportador se realiza doblando la guía metálica. Las ventajas del transportador de cadena deslizante son el bajo costo y la simplicidad en el manejo de las tarimas y en la realización de los giros. La desventaja es que no se pueden hacer intersecciones perpendiculares. Además, los giros deben hacerse en amplios arcos, lo que ocupa un piso considerable.

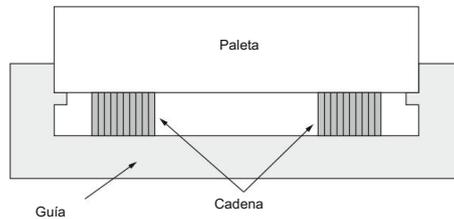


Fig. 11.12 Transportador de cadena deslizante (vista final)

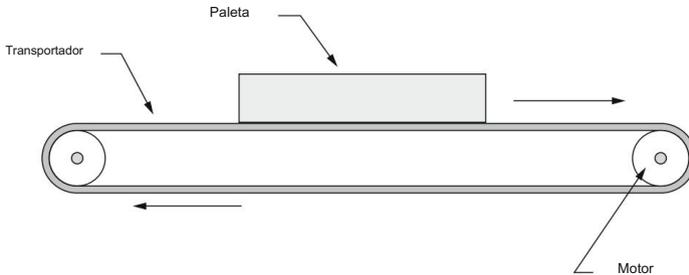


Fig. 11.13 Cinta transportadora

espacio en la planta de producción. El transportador de cadena deslizante es más adecuado cuando se utiliza como un sistema de alimentación de bucle único.

Con el transportador accionado por correa, la parte superior de la correa está impulsando paletas u otros objetos o materiales (Fig. 11.13). Un giro o intersección se realiza con la ayuda de un dispositivo especial que permite levantar, transferir y girar las paletas.

Un transportador también puede constar de rodillos accionados por un eje de transmisión común (Fig. 11.14). El eje de transmisión transmite el par a través de una correa de transmisión al eje del rodillo. La ventaja del transportador con rodillos radica en las bajas fuerzas de colisión que se producen entre las paletas u objetos manipulados por el transportador. Son la consecuencia de la baja fricción entre los rodillos y los palets. Los giros se realizan mediante el uso de dispositivos de elevación y transferencia. Las desventajas de los transportadores con rodillos son el alto costo y las bajas aceleraciones.

11.5 Pinzas y herramientas robóticas

De la misma manera que los robots manipuladores son copias del brazo humano, las pinzas robóticas imitan la mano humana. En la mayoría de los casos, las pinzas robóticas son considerablemente más simples que la mano humana y abarcan la muñeca y los dedos, en total 22 grados de libertad.

Las pinzas robóticas industriales difieren en gran medida, por lo que no es difícil entender que su costo va desde casi insignificante hasta más alto que el costo de la manipulación de un robot.

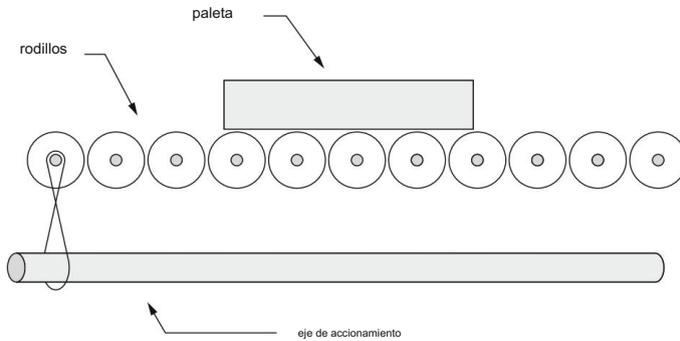


Fig. 11.14 Transportador con rodillos

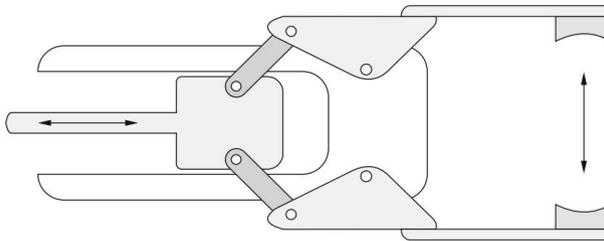


Fig. 11.15 Pinza robótica con dos dedos

ulador Aunque muchas pinzas robóticas diferentes están disponibles comercialmente, a menudo es necesario desarrollar una pinza especial para cumplir con los requisitos de una tarea robótica específica.

Las pinzas de los robots más características son las que tienen dedos. Se pueden dividir en pinzas de dos dedos (Fig. 11.15) y pinzas de varios dedos. La mayoría de las pinzas de dedos múltiples tienen tres dedos (Fig. 11.16), para lograr un mejor agarre. En aplicaciones industriales solemos encontrar pinzas con dos dedos. Las pinzas de dos dedos más simples solo se controlan entre los dos estados, abierto y cerrado. También hay disponibles pinzas de dos dedos, en las que se puede controlar la distancia o la fuerza entre los dedos. Las pinzas de varios dedos suelen tener tres dedos, cada uno de los cuales tiene tres segmentos. Una pinza de este tipo tiene 9 grados de libertad, que es más que un robot manipulador. El costo de dichas pinzas es alto. En las pinzas de varios dedos, los motores a menudo no se colocan en las articulaciones de los dedos, ya que los dedos pueden volverse pesados o no lo suficientemente fuertes. En cambio, todos los motores se colocan en la palma de la pinza, mientras que los tendones los conectan con poleas en las articulaciones de los dedos. Además de pinzas con dedos, en robótica industrial también existen pinzas de vacío, magnéticas, de perforación y adhesivas. Las diferentes herramientas de efectores finales, utilizadas en la pintura por pulverización, el acabado o la soldadura, no se consideran pinzas robóticas.

Las pinzas de dos dedos se utilizan para sujetar las piezas en un proceso de montaje robótico. En la figura 11.15 se muestra un ejemplo de una pinza de este tipo. Diferentes puntos finales pueden

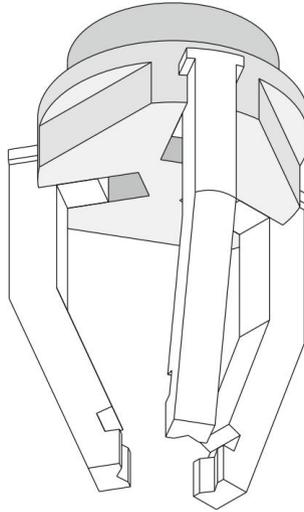


Fig. 11.16 Pinza robótica con tres dedos

sujetarse a los dedos para adaptar el agarre del robot a la forma y superficie de la pieza o ensamblaje que se va a agarrar. En las pinzas robóticas de dos dedos se utilizan motores neumáticos, hidráulicos o eléctricos. El accionamiento hidráulico permite mayores fuerzas de agarre y, por lo tanto, el manejo de objetos más pesados. En la Fig. 11.17 se presentan diferentes estructuras de pinzas de dos dedos. Las presentaciones cinemáticas simples permiten elegir una pinza apropiada para la tarea seleccionada. La pinza del lado derecho de la figura 11.17 permite agarrar con los dedos en paralelo.

En los procesos industriales, los manipuladores de robots se utilizan a menudo para la carga de máquinas. En tales casos, el robot es más eficiente cuando se utiliza una pinza doble. El robot puede traer simultáneamente una pieza sin terminar a la máquina mientras saca una pieza terminada de ella. En la figura 11.18 se muestra una pinza doble.

Se utilizan pinzas específicas para agarrar objetos calientes. Aquí, los actuadores se colocan lejos de los dedos. Cuando se manipulan objetos calientes, se aplica enfriamiento por aire, mientras que a menudo la pinza se sumerge en agua como parte del ciclo de manipulación. De suma importancia es también la elección del material apropiado para los dedos.

Al agarrar objetos ligeros y frágiles, se pueden utilizar pinzas con dedos elásticos. De esta manera se limita la fuerza de agarre máxima, mientras que al mismo tiempo permite una manera simple de abrir y cerrar los dedos. En la figura 11.19 se muestra un ejemplo de una pinza simple con dos dedos de resorte.

La forma del objeto requiere un diseño cuidadoso de una pinza robótica de dos dedos. Se puede lograr un agarre confiable ya sea por la forma o por el cierre forzado de los dos dedos. También es posible la combinación de los dos modos de agarre (Fig. 11.20).

Al ejecutar un agarre de robot con dos dedos, la posición de los dedos con respecto al objeto también es importante. La fuerza de agarre sólo se puede aplicar en la parte externa

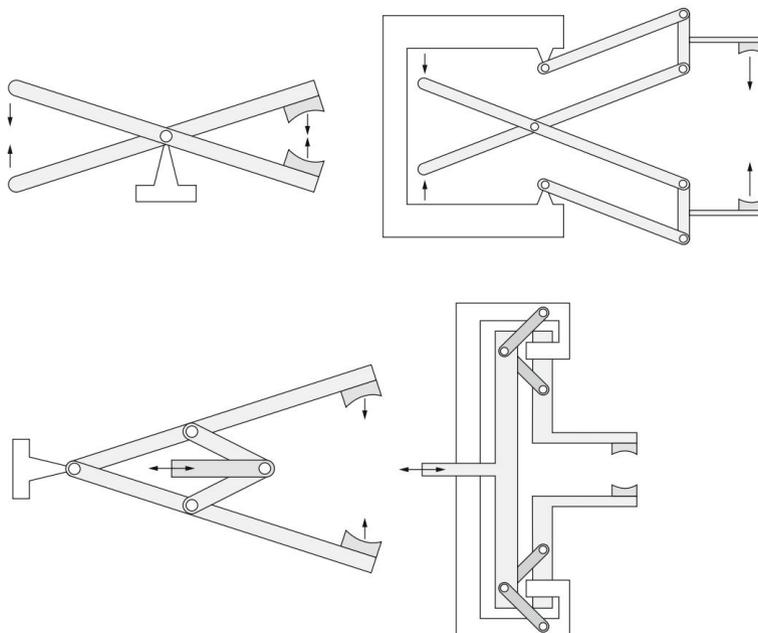


Fig. 11.17 Presentaciones cinemáticas de pinzas de dos dedos

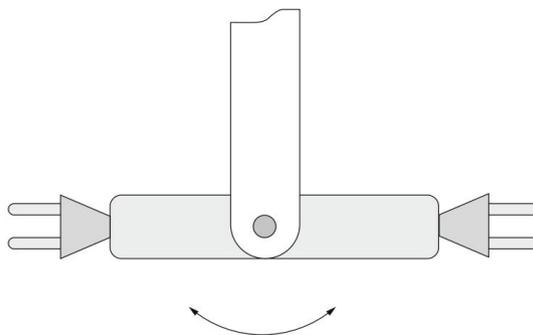


Fig. 11.18 Pinza robótica doble

superficies o sólo en las superficies internas de una pieza de trabajo. También es posible un agarre intermedio cuando el objeto se agarra en superficies internas y externas (Fig. 11.21).

Entre las pinzas robóticas sin dedos, las pinzas de vacío son, con diferencia, las más utilizadas. Las pinzas de vacío o las pinzas con presión negativa se aplican con éxito en los casos en que la superficie del objeto agarrado es plana o uniformemente curvada, lisa, seca y relativamente limpia. Las ventajas de estas pinzas son la fiabilidad, el bajo coste y el peso reducido. Los cabezales de succión de varias formas están disponibles comercialmente.

A menudo, se utilizan varios cabezales de succión juntos, colocados en un patrón que se adapte a la

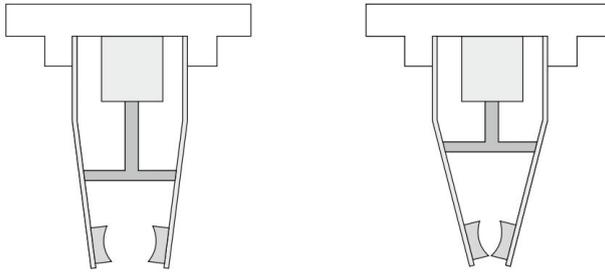


Fig. 11.19 Pinza con dedos elásticos

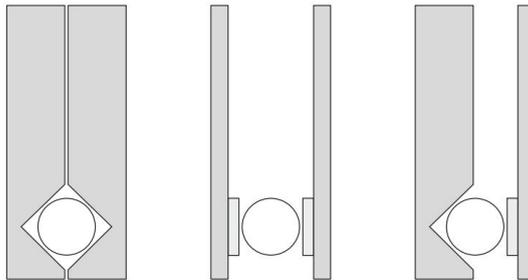


Fig. 11.20 Cierre de forma, cierre forzado y prensión combinada



Fig. 11.21 Agarre externo, interno e intermedio

forma del objeto a agarrar. La figura 11.22 muestra la forma de dos cabezales de succión de uso frecuente. La cabeza de la izquierda es apropiada en los casos en que la superficie no es completamente lisa. El material blando de la cabeza se adapta a la forma del objeto.

Los pequeños pezones en la cabeza que se presentan en el lado derecho de la Fig. 11.22 evitan dañar la superficie del objeto. El vacío se produce con Venturi o bombas de vacío.

La bomba Venturi necesita más potencia y produce solo un 70% de vacío. Sin embargo, se suele utilizar en procesos industriales debido a su sencillez y bajo coste. Las bombas de vacío proporcionan un 90 % de vacío y producen un ruido considerablemente menor. En todas las pinzas, se requiere un agarre y liberación rápidos de los objetos. La liberación de objetos muy ligeros y pegajosos puede ser fundamental con las pinzas de vacío. En este caso soltamos los objetos con la ayuda de presión positiva como se muestra en la figura 11.23.

Las pinzas magnéticas son otro ejemplo de pinzas sin dedos: utilizan imanes permanentes o electroimanes. Los electroimanes se utilizan en mayor medida.

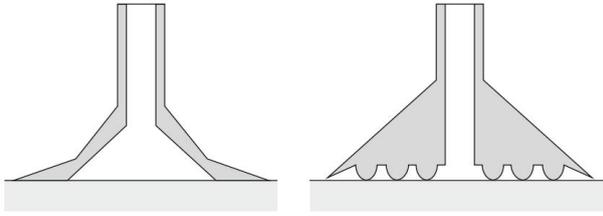


Fig. 11.22 Cabezales de succión de ventosas

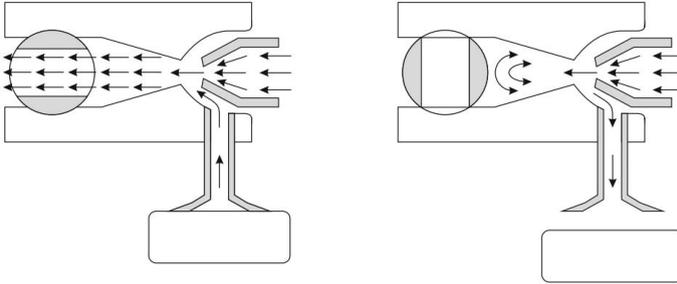


Fig. 11.23 Agarrar y soltar un objeto con la ayuda de presión negativa y positiva

Con imanes permanentes, la liberación del objeto presenta una dificultad. El problema se resuelve utilizando una trayectoria especialmente planificada del efector final donde el objeto es retenido por una valla en el espacio de trabajo del robot. En las pinzas magnéticas se utilizan varios imanes juntos, colocados en varios patrones correspondientes a la forma del objeto. Ya pequeñas fisuras de aire entre el imán y el objeto disminuyen considerablemente la fuerza magnética. Por lo tanto, las superficies de los objetos a agarrar deben ser uniformes y limpias.

Las pinzas de perforación se consideran pinzas robóticas especiales. Aquí los objetos son simplemente perforados por la pinza. Por lo general, estos se utilizan para manipular materiales como textiles o gomaespuma. Dichas pinzas se pueden usar solo en los casos en que la perforación no cause daños al objeto. Las hojas de tela se pueden agarrar con cepillos grandes hechos de pelos rígidos de nailon o simplemente con tiras de velcro.

Las pinzas adhesivas se pueden utilizar para sujetar piezas muy ligeras. La liberación de las piezas debe resolverse mediante trayectorias especiales de punto final del robot donde la pieza choca con la guía en el espacio de trabajo del robot y, por lo tanto, se retira de la pinza adhesiva. Se proporciona suficiente fuerza adhesiva utilizando cinta adhesiva que debe moverse durante la operación.

Además de las pinzas, el robot puede tener otras herramientas unidas a su extremo. La forma y la función de la herramienta dependen de la tarea de la célula robótica. La operación más frecuente que realizan los robots es la soldadura. Para fines de soldadura, se pueden utilizar varios enfoques diferentes. Entre ellos la herramienta más frecuente adjunta al robot

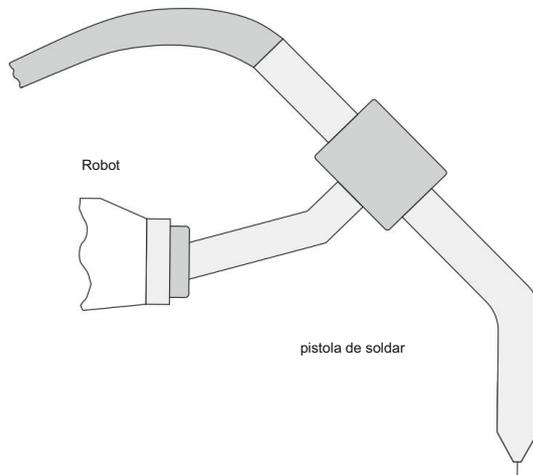


Fig. 11.24 Robot con pistola de soldar unida a su extremo

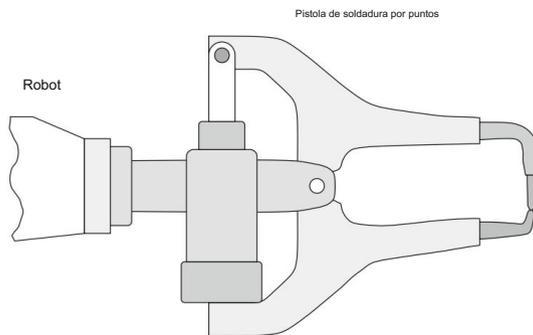


Fig. 11.25 Robot con pistola de soldadura por puntos unida a su extremo

El extremo es una pistola o soplete de soldadura por arco (Fig. 11.24) para transmitir la corriente de soldadura desde un cable hasta el electrodo. La tarea se realiza en muchas áreas diferentes de fabricación. Además de la soldadura por arco, también se pueden encontrar pistolas de soldadura por puntos (Fig. 11.25) en los procesos de fabricación, principalmente en la industria automotriz.

Capítulo 12

Robots colaborativos



En 1942 Isaac Asimov publicó la novela de ciencia ficción "Yo, robot", donde se introducían las tres leyes de la robótica. La primera regla establecía que "Un robot no puede dañar a un ser humano o, por inacción, permitir que un ser humano sufra daño".

Hasta ahora, los robots industriales siempre han sido dispositivos rápidos y robustos que trabajan en tareas específicas diseñadas para ellos. Para cumplir con la regla antes mencionada, se desempeñaban detrás de guardias fijas e interbloqueadas y equipo de protección sensible para evitar la intrusión humana en su espacio de trabajo. Con la introducción de robots colaborativos, las jaulas se omiten ya que esos robots están diseñados para trabajar con humanos. Están construidos con diferentes características de seguridad para evitar colisiones, pero si ocurre una colisión, el mecanismo se moverá en la dirección opuesta o se detendrá por completo para evitar causar lesiones.

La especificación técnica ISO/TS 15066:2016: Robots y dispositivos robóticos: robots colaborativos complementa los requisitos y la orientación sobre el funcionamiento colaborativo de robots industriales proporcionados en ISO 10218-1:2011 e ISO 10218-2:2011 (ANSI/RIA R15.06):2012). Especifica los requisitos de seguridad para los sistemas de robots industriales colaborativos y el entorno de trabajo. Específicamente, ISO/TS 15066:2016 proporciona una guía integral para la evaluación de riesgos en aplicaciones de robots colaborativos.

12.1 Sistema de Robot Industrial Colaborativo

Un robot colaborativo es un robot que se puede utilizar en una operación colaborativa, donde un sistema de robot diseñado a propósito y un operador humano trabajan en cooperación directa dentro de un espacio de trabajo definido. El término robot define el brazo del robot y el control del robot y no incluye el efector final o la pieza del robot. Con el término sistema de robot describimos robot, efector final y pieza de trabajo.

Para el sistema de robot colaborativo podemos definir diferentes espacios de trabajo (Fig. 12.1):

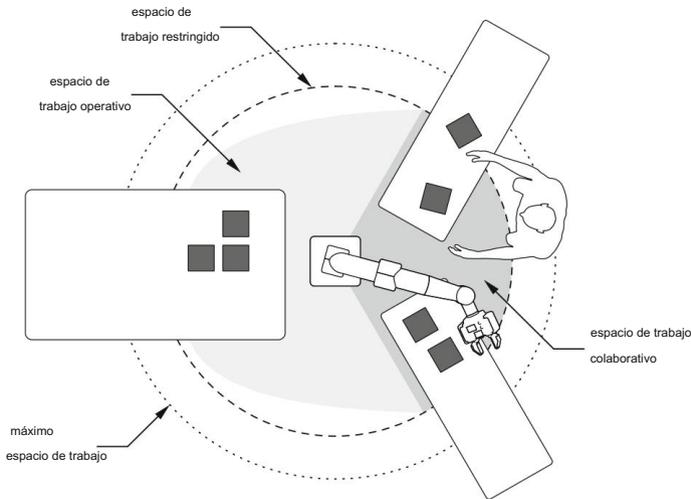


Fig. 12.1 Espacio de trabajo máximo (limitado por línea punteada), espacio de trabajo restringido (limitado por línea discontinua), espacio de trabajo operativo (áreas grises) y espacio de trabajo colaborativo (área gris oscura)

- espacio de trabajo máximo: espacio que pueden barrer los segmentos móviles del robot según lo definido por el fabricante más el espacio que pueden barrer el efector final y la pieza de trabajo;
- espacio de trabajo restringido: porción del espacio máximo restringido por dispositivos limitadores que establezcan límites que no serán rebasados;
- espacio de trabajo operativo: parte del espacio restringido que se utiliza realmente mientras realizar todos los movimientos ordenados por el programa de tareas;
- espacio de trabajo colaborativo: parte del espacio operativo donde el sistema de robot y un ser humano pueden realizar tareas simultáneamente durante la operación de producción.

El espacio de trabajo colaborativo debe diseñarse de manera que el operador pueda realizar todas las tareas previstas. La ubicación de la maquinaria y el equipo no debe presentar ningún peligro adicional para la seguridad. En el espacio de trabajo colaborativo se aplican limitaciones estrictas sobre la velocidad, los límites de espacio y la detección de par para garantizar la seguridad del operador. Fuera del espacio de trabajo colaborativo, el robot puede actuar como un robot industrial tradicional sin ninguna limitación particular, excepto aquellas relacionadas con la tarea.

El término operador incluye a todo el personal que está en contacto con el sistema de robot, no solo a los operadores de producción. Incluye personal de mantenimiento, solución de problemas, configuración, limpieza y producción.

Las características operativas de los sistemas de robots colaborativos son significativamente diferentes de las de los sistemas de robots industriales tradicionales presentados en las normas ISO 10218-1:2011 e ISO 10218-2:2011. En las operaciones de robots colaborativos, los operadores pueden trabajar en proximidad directa al sistema de robot mientras el sistema está activo, y el contacto físico entre un operador y el sistema de robot puede ocurrir dentro del espacio de trabajo colaborativo. Por lo tanto, se deben introducir medidas de protección adecuadas para colaborar.

sistemas de robot alternativos para garantizar la seguridad del operador en todo momento durante la colaboración operación de robots

12.2 Robot colaborativo

El diseño de robots colaborativos se está alejando de los robots industriales pesados, rígidos y rígidos hacia dispositivos ligeros con un cumplimiento activo y/o pasivo.

El uso de metales ligeros de alta resistencia o materiales compuestos para enlaces de robots. contribuye a una pequeña inercia en movimiento que afecta aún más el consumo de energía de los motores Los manipuladores en serie pueden equiparse con motores de alta potencia/torque con Engranajes de alta relación de transmisión en cada articulación o tienen motores colocados en la base mientras la potencia se transfiere a través de los tendones. Si la relación de transmisión es pequeña, el sistema es intrínsecamente manejable hacia atrás.

El uso de actuadores intrínsecamente flexibles permite el diseño de inspirados biológicamente robots, ya que los actuadores imitan las actuaciones de los músculos humanos/animales. El Los actuadores pueden tener una impedancia mecánica fija controlada a través del control activo, como como actuador elástico en serie (SEA), o la impedancia se puede ajustar cambiando parámetros de una junta mecánica, como en el actuador de rigidez variable (VSA). MAR es un combinación de motor, caja de cambios y un resorte, donde se mide el giro del resorte para controlar la salida de la fuerza, mientras que la medida del giro del resorte se usa como sensor de fuerza. VSA se puede utilizar para hacer que el robot sea más seguro en caso de colisión a medida que se reducen la rigidez de la articulación y la inercia de impacto. Diseños conceptuales de SEA y VSA se presentan en la Fig. 12.2.

Los robots colaborativos también tienen geometrías especiales que minimizan la energía de contacto transferencia maximizando el área de impacto. Los robots tienen formas redondas e integrados. características que reducen el riesgo de puntos de pellizco y la gravedad de un impacto. Principal Las características del robot colaborativo se presentan en la Fig. 12.3

Para garantizar un alto nivel de seguridad, el sistema de robot debe incluir diferentes sensores para monitorear el estado del robot y su espacio de trabajo como se presenta en el Cap. 7. Los robots pueden estar equipados con sensores de torsión conjunta, sensores de fuerza/torsión en el efector final y diferentes sensores táctiles utilizados como una piel blanda o una cubierta dura para el robot. Todos estos sensores permiten que el robot detecte el contacto con el entorno (operador) o evitar la colisión anticipándose a ella y respondiendo en consecuencia. Algunos robots utilizan

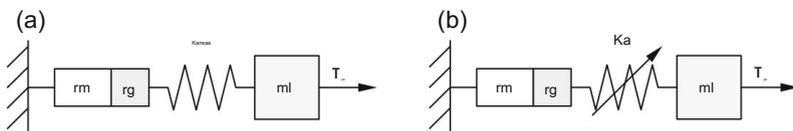


Fig. 12.2 a Actuador elástico en serie (SEA), b Actuador de rigidez variable (VSA); rm y rg representan motor y caja de cambios, elemento compatible con K_s con rigidez fija, elemento compatible con K_a ajustable, ml la masa del eslabón en movimiento y T_r el par de torsión de la articulación que provoca el movimiento del eslabón

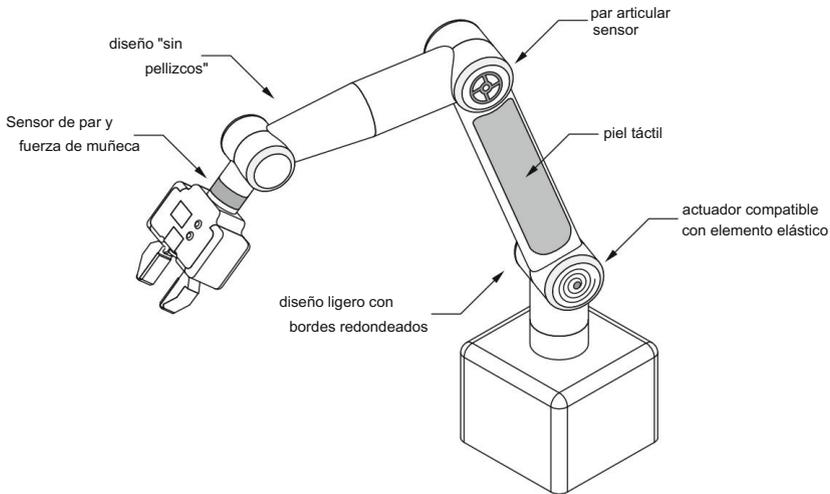


Fig. 12.3 Características de diseño de un robot colaborativo

codificadores redundantes en cada unión para sustituir los costosos pares de unión; la fuerza se puede derivar de la corriente del motor conocida y la posición de la articulación. Los sistemas de robot pueden incluir otros sensores con clasificación de seguridad, por ejemplo, cámaras de seguridad, escáneres láser, cortinas láser, tapetes de seguridad y otros equipos de protección electro-sensibles, para detectar la presencia del operador en el entorno del robot. Luego, esta información se puede usar para una respuesta adecuada del robot para evitar que el operador se apriete, comprima

Los sensores incorporados se pueden utilizar para el control seguro del robot. El paradigma principal es cómo manejar el contacto físico entre el mecanismo y el entorno. Uno de los esquemas de control más populares es el control de impedancia, que se basa en el modelo de robot dinámico (5.56). El modelo dinámico se utiliza para evaluar los pares de articulación necesarios para el movimiento adecuado del robot. Si los pares de articulación medidos se desvían del valorado, entonces la diferencia se detecta como una colisión. Cuando se detecta una colisión, se debe activar la estrategia de respuesta adecuada para evitar un peligro potencial para el operador. El robot puede ignorar el contacto y seguir la trayectoria de referencia, o se puede detener el robot. Otras posibilidades incluyen cambiar de control de posición a control de par de gravedad cero (cumplimiento muy alto del robot), cambiar a control de par con el uso de señales de pares de articulación para minimizar la inercia del eslabón y del motor (incluso robot "más ligero"), o para use pares medidos externos y cambie al control de admitancia, donde el robot y el objeto colisionado actúan como dos imanes enfrentados con los mismos polos juntos.

El objetivo de los robots colaborativos es combinar lo mejor de los robots y del operador humano: la precisión, potencia y resistencia del robot junto con la excelente capacidad del operador humano para resolver problemas imprecisos. Como el robot y los operadores colaboran en el mismo espacio de trabajo, se permite el contacto entre robots y humanos. Si ocurre un contacto incidental, entonces ese contacto no debe

resultar en dolor o lesión. Como tal, los robots colaborativos se pueden usar junto con los operadores y mejorar la productividad de los trabajadores. Los robots son livianos y ocupan poco espacio, por lo que se pueden mover fácilmente por el taller, lo que aumenta su versatilidad.

La programación de los robots colaborativos es simple, en su mayoría se realiza con guía manual, por lo que el uso del robot es muy flexible; el robot puede estar operativo en una nueva estación de trabajo en muy poco tiempo.

12.3 Operación colaborativa

La operación colaborativa no se define solo con el uso del robot, sino que está condicionada por la tarea, lo que está haciendo el sistema de robot y el espacio en el que se realiza la tarea. Se pueden incluir cuatro técnicas principales (una o una combinación de más) en la operación colaborativa:

- parada supervisada con clasificación de seguridad; • guía manual; • control de velocidad y separación;
- limitación de potencia y fuerza.

Con las cuatro técnicas, el robot funciona en modo automático. Los detalles principales de los cuatro métodos se presentan en la Tabla 12.1. Descripciones más detalladas están disponibles más abajo.

Tabla 12.1 Tipos de operaciones colaborativas Velocidad Pares

			Controles del operador	Técnica
Parada supervisada con clasificación de seguridad	Cero mientras el operador está en el espacio de trabajo colaborativo	Solo compensación de gravedad y carga	Ninguno mientras el operador está en el espacio de trabajo colaborativo	Sin movimiento en presencia del operador
Guía manual	Velocidad monitoreada con clasificación de seguridad	Como por entrada directa del operador	Parada de emergencia, dispositivo de habilitación, entrada de movimiento	Movimiento solo por entrada directa del operador
Monitoreo de velocidad y separación	Velocidad monitoreada con clasificación de seguridad	Según sea necesario para mantener mín. distancia de separación y para ejecutar la aplicación	Ninguno mientras el operador está en el espacio de trabajo colaborativo	Contacto evitado entre el sistema de robot y el operador
Limitación de potencia y fuerza	máx. velocidad determinada para limitar las fuerzas de impacto	máx. par determinado para limitar las fuerzas estáticas	Según lo requiera la aplicación	El robot no puede impartir fuerza excesiva (por diseño o control)

12.3.1 Parada supervisada con clasificación de seguridad

En este método, el sistema de robot debe estar equipado con dispositivos con clasificación de seguridad que detecten la presencia del operador dentro del espacio de trabajo colaborativo (por ejemplo, cortinas de luz o escáneres láser). El operador puede interactuar con el sistema de robot en el espacio de trabajo colaborativo solo cuando la función de parada monitoreada con clasificación de seguridad del robot está activa y el movimiento del robot se detiene antes de que el operador ingrese al espacio de trabajo compartido. Durante la tarea colaborativa, el robot está parado con los motores encendidos. El movimiento del sistema de robot puede reanudarse solo cuando el operador ha salido del espacio de trabajo colaborativo. Si no hay un operador en el espacio de trabajo colaborativo, el robot puede funcionar como un robot industrial clásico, por ejemplo, de forma no colaborativa.

Las operaciones de la parada monitoreada con clasificación de seguridad se presentan en la Tabla 12.2. Cuando el operador está fuera del espacio de trabajo colaborativo, el robot puede funcionar sin ninguna limitación. Pero en el caso de que el robot esté presente en el espacio de trabajo al mismo tiempo que el operador, la parada monitoreada con clasificación de seguridad del robot debe estar activa. De lo contrario, el robot debe activar la parada de protección de categoría 0 (parada no controlada del robot desconectando inmediatamente la alimentación de los actuadores) en caso de fallo (IEC 60204-1).

Este método se puede aplicar a aplicaciones de carga o descarga manual del efector final, inspecciones de trabajo en curso y aplicaciones en las que solo se mueve uno en el espacio de trabajo colaborativo (por ejemplo, robot u operador). Las paradas monitoreadas con clasificación de seguridad también se pueden integrar con otras técnicas de colaboración.

12.3.2 Guía manual

Para guiar manualmente, el robot debe estar equipado con un dispositivo de guía especial ubicado en o cerca del efector final del robot que sirve para transmitir comandos de movimiento al sistema de robot. El dispositivo debe incorporar una parada de emergencia y un dispositivo de habilitación a menos que el sistema de robot cumpla con las medidas de diseño intrínsecamente seguras o las funciones de limitación de seguridad. La ubicación del dispositivo de guía debe permitir al operador

Tabla 12.2 Acciones del robot para parada monitoreada con clasificación de seguridad

		Proximidad del operador al espacio de trabajo colaborativo	
		Afuera	Adentro
La proximidad del robot a la colaboración espacio de trabajo	Afuera	Continuar	Continuar
	Adentro y en movimiento	Continuar	Tope de protección
	Parada monitoreada con clasificación de seguridad en el interior	Continuar	Continuar

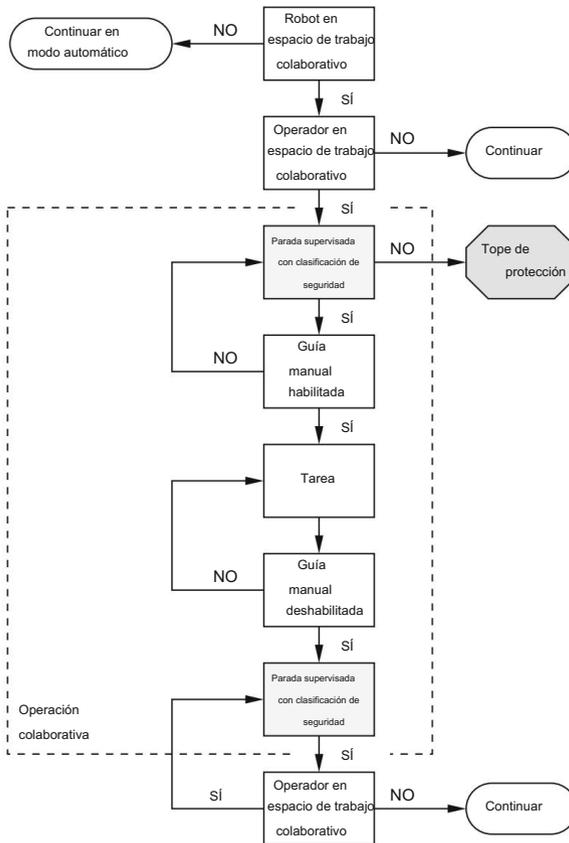


Fig. 12.4 Secuencia operativa para el guiado manual

observe directamente el movimiento del robot y evite situaciones peligrosas (p. ej., el operador está parado bajo una carga pesada). El control del robot y el efector final debe ser intuitivamente comprensible y controlable.

El sistema de robot está listo para el guiado manual cuando ingresa al espacio de trabajo colaborativo y emite una parada monitoreada con clasificación de seguridad. En este punto, el operador puede ingresar al espacio de trabajo colaborativo y tomar el control del sistema de robot con el dispositivo de guía manual. Si el operador ingresa al espacio de trabajo colaborativo antes de que el sistema esté listo para el guiado manual, se debe emitir una parada de protección. Una vez que se borra la parada con control de seguridad, el operador puede realizar la tarea de guía manual. Cuando el operador suelta el dispositivo de guía, se emite la parada monitoreada con clasificación de seguridad. La operación no colaborativa se reanuda cuando el operador abandona el espacio de trabajo colaborativo. La secuencia operativa para el guiado manual se presenta en la Fig. 12.4.

Esta técnica de colaboración es adecuada para su implementación en aplicaciones en las que el sistema de robot actúa como un amplificador de potencia, en aplicaciones muy variables,

donde se utiliza un sistema de robot como herramienta, y en aplicaciones donde se necesita la coordinación de pasos manuales y parcialmente automatizados. La colaboración de guía manual se puede implementar con éxito en producciones limitadas o de lotes pequeños.

12.3.3 Monitoreo de velocidad y separación

En este método, el operador y el sistema de robot pueden moverse simultáneamente en el espacio de trabajo colaborativo. Durante las operaciones conjuntas, la distancia mínima de separación de protección entre el operador y el sistema de robot se mantiene en todo momento. La distancia de separación de protección es la distancia más corta permitida entre cualquier parte peligrosa móvil del sistema de robot y el operador en el espacio de trabajo colaborativo.

La distancia de separación de protección S_p en el tiempo t_0 se puede describir mediante (12.1):

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r , \quad (12.1)$$

donde S_h es la contribución a la distancia de separación de protección atribuida al cambio de ubicación del operador. La fórmula tiene en cuenta la distancia de frenado S_r , que es la distancia debida al tiempo de reacción del robot, y S_s que describe la distancia debida a la distancia de frenado del sistema de robot. C presenta la distancia de intrusión, que es la distancia que una parte del cuerpo puede invadir el campo de detección antes de ser detectada. La distancia de separación de protección S_p también incluye la incertidumbre de posición del operador Z_d , que resulta de la tolerancia de medición de detección, y la incertidumbre de posición del sistema de robot Z_r , que resulta de la precisión del sistema de medición de posición del robot. Las velocidades máximas permitidas y las distancias mínimas de separación de protección en una aplicación pueden ser variables o constantes. Las diversas contribuciones a la distancia de separación de protección se ilustran en la Fig. 12.5.

El robot debe estar equipado con una función de velocidad monitoreada con clasificación de seguridad y una parada monitoreada con clasificación de seguridad. El sistema de robot también incluye periféricos adicionales con clasificación de seguridad para el monitoreo humano (por ejemplo, sistemas de cámara con clasificación de seguridad). El sistema de robot puede mantener la distancia de separación de protección mínima mediante la reducción de la velocidad, lo que podría ser seguido por una parada monitoreada con clasificación de seguridad o la ejecución de una ruta alternativa que no viole la distancia de separación de protección, como se presenta en la Fig. 12.6. Si la distancia de separación real entre el sistema de robot y el operador cae por debajo de la distancia de separación de protección, el sistema de robot debe iniciar una parada de protección e iniciar las funciones relacionadas con la seguridad conectadas al sistema de robot (p. ej., apagar cualquier herramienta peligrosa). Cuando el operador se aleja del robot, la distancia de separación real cumple y supera la distancia de separación de protección; en este punto, el robot puede reanudar el movimiento automáticamente.

El monitoreo de velocidad y separación es útil en aplicaciones donde el sistema de robot y las tareas del operador se ejecutan simultáneamente.

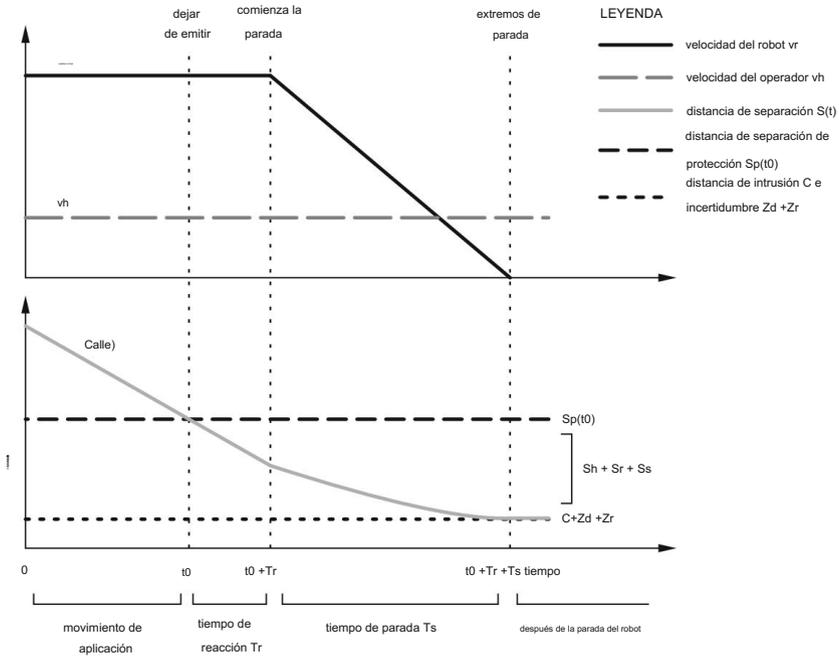


Fig. 12.5 Representación gráfica de las contribuciones a la distancia de separación de protección entre un operador y un robot

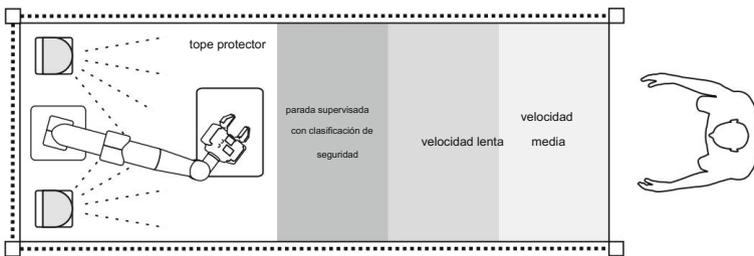


Fig. 12.6 Niveles con clasificación de seguridad para mantener la distancia mínima de separación de protección

12.3.4 Limitación de potencia y fuerza

El método de limitación de potencia y fuerza permite el contacto físico entre el sistema de robot y el operador, que puede ocurrir de forma intencionada o no intencionada. El método exige que los robots se diseñen específicamente por medio de baja inercia, geometría adecuada (bordes y esquinas redondeados, superficies lisas y flexibles), materiales (acolchado, amortiguación, componentes deformables) y funciones de control. El primero incluye métodos de diseño de seguridad activa, como la limitación de fuerzas y par

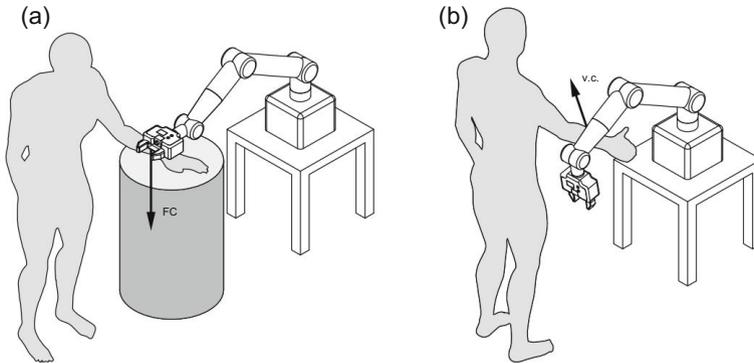


Fig. 12.7 un contacto cuasiestático yb transitorio

limitar las velocidades de las partes móviles, limitar el impulso limitando las masas en movimiento y limitar la potencia mecánica o la energía en función de las masas y las velocidades. El diseño del robot también puede incluir el uso de ejes blandos con clasificación de seguridad, funciones de limitación de espacio y funciones de parada monitoreadas con clasificación de seguridad. Algunos robots también incluyen detección para anticipar o detectar contacto.

El contacto entre el robot colaborativo y las partes del cuerpo del operador podría ser:

- previsto como parte de la secuencia de aplicación;
- incidental por no seguir el procedimiento de trabajo, pero sin falla técnica
ura;
- un modo de falla que conduce a situaciones de contacto.

Hay dos posibles tipos de contacto entre la parte móvil del sistema de robot y las áreas del cuerpo del operador. El contacto casi estático (figura 12.7a) incluye una situación de sujeción o aplastamiento en la que una parte del cuerpo del operador queda atrapada entre una parte móvil del sistema de robot y otra parte fija o móvil de la celda de trabajo. En esta situación, la presión o fuerza F_c del sistema de robot se aplica durante un período prolongado de tiempo hasta que se alivian las condiciones. El contacto transitorio (es decir, impacto dinámico, Fig. 12.7b) describe el contacto entre la parte móvil del sistema de robot y la parte del cuerpo del operador sin sujetar o atrapar esa parte.

El contacto real es más corto que el contacto cuasiestático mencionado anteriormente (<50 ms) y depende de la inercia del robot, la inercia de la parte del cuerpo del operador y la velocidad relativa v_c de los dos.

El sistema de robot debe diseñarse adecuadamente para reducir el riesgo para un operador al no exceder los valores límite de umbral aplicables de fuerza y presión para contacto cuasiestático y transitorio. Los límites pueden aplicarse a fuerzas, torsiones, velocidades, cantidad de movimiento, potencia mecánica, rangos de movimiento de las articulaciones o rangos espaciales. El valor límite del umbral para el evento de contacto relevante en la región del cuerpo expuesta se determina para el peor de los casos para ambos tipos de contacto.

Los valores límite presentados en ISO/TS 15066:2016 se basan en una estimación conservadora y en investigaciones científicas sobre las sensaciones de dolor. Algunos valores informativos para

Tabla 12.3 Límites biomecánicos para contacto cuasi-estático

área del cuerpo	Máximo permitido presión pQS/N/cm2	Máximo permitido fuerza FQS/N
Séptimo músculo del cuello	210	150
Articulación del hombro	160	210
Esternón	120	140
Abdomen	140	110
Pelvis	210	180
Húmero	220	150
Antebrazo	180	160
Palmera	260	140
almohadilla del dedo índice	300	140
Articulación del extremo del índice	280	140
Detrás de la mano	200	140
Hermético	250	220
Rótula	220	220
espinilla	220	130
Becerro	210	130

presión máxima admisible y la fuerza máxima admisible entre el robot

la parte y la región del cuerpo del operador en contacto casi estático se presentan en la Tabla 12.3.

Los valores de presión y fuerza para el contacto transitorio (p_T , FT) pueden ser al menos dos veces los valores para contacto cuasiestático (p_{QS} , F_{QS}).

$$p_T = 2 \cdot p_{QS} \quad FT \quad (12.2)$$

$$= 2 \cdot F_{QS} \quad (12.3)$$

El contacto con la cara, el cráneo o la frente no está permitido y debe evitarse.

Para que las reacciones del sistema del robot sean adecuadas, se deben tomar los límites de presión y fuerza en consideración, dependiendo de la situación. En caso de sujeción del cuerpo del operador parte (por ejemplo, la mano del operador), la fuerza resultante puede estar muy por debajo del umbral límite por lo que el límite de presión será el factor limitante. Por el contrario, si el contacto está entre dos áreas bastante grandes y blandas (por ejemplo, la parte acolchada del robot y la parte del operador abdomen), la presión resultante estará por debajo del umbral límite y la limitación factor será entonces el límite de fuerza.

En caso de contacto, el sistema de robot debe reaccionar de manera que el efecto del contacto identificado permanece por debajo de los valores límite de umbral identificados, tal como se presentan en la figura 12.8. En caso de sujetar o fijar una parte del cuerpo entre un segmento de robot y algún otro objeto, el robot debe limitar la velocidad para cumplir con la protección límites. El robot también debe tener una opción integrada para que el operador extraer el área del cuerpo afectada.

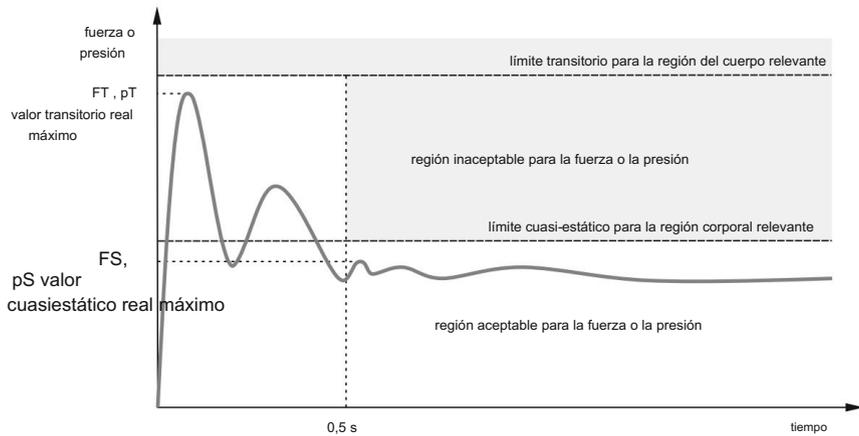


Fig. 12.8 Representación gráfica de las fuerzas o presiones aceptables e inaceptables en caso de contacto cuasiestático o transitorio

El método de limitación de potencia y fuerza se puede utilizar en aplicaciones colaborativas en las que se necesita con frecuencia la presencia del operador, en operaciones que dependen del tiempo (donde no se desea el retraso debido a paradas con clasificación de seguridad, pero puede producirse contacto físico entre el sistema de robot y el operador), y aplicaciones con piezas pequeñas y alta variabilidad de montaje.

12.4 Pinzas robóticas colaborativas

El diseño y control de un robot colaborativo permite que el robot esté seguro mientras trabaja junto con el operador. Pero el robot en sí es solo una parte del sistema robótico. Las pinzas representan una parte importante del sistema de robot, ya que se utilizan para la manipulación de objetos en las inmediaciones del operador. Como tal, las pinzas deben alcanzar un alto nivel de seguridad.

Las pinzas generalmente están unidas rígidamente al robot ya seguro con limitaciones de velocidad y fuerza incorporadas. La forma y los materiales de la pinza deben coincidir con el diseño de seguridad evitando que se excedan los límites de presión en el área de contacto del cuerpo del operador. Además, las pinzas en la punta del robot deben crear la menor inercia posible para interferir mínimamente con las funciones de seguridad del robot.

El diseño de las pinzas debe evitar que el operador se atasque los dedos en la pinza o en los cables de conexión. Las pinzas deben tener implementado un modo seguro bajo una parada de emergencia, cuya función depende de la aplicación.

Si hay una parte agarrada, el operador generalmente quiere que la parte permanezca agarrada de manera segura. Al programar y cerrar la pinza, el operador quiere que la pinza deje de aplicar la fuerza.

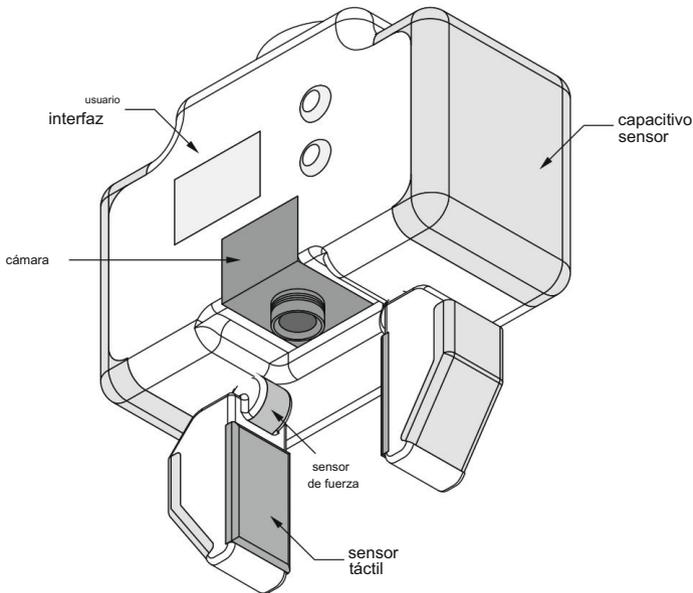


Fig. 12.9 Diseño conceptual de una pinza para agarre colaborativo

Cuando la pinza interactúa con la pieza, el operador quiere un buen agarre sólido.

La empuñadura también debe ser segura en caso de parada de emergencia o pérdida de energía, ya que una pieza que se caiga podría representar un peligro para un operador, un robot o el entorno. Si el robot se mueve rápido, la parte que se cae podría convertirse en un proyectil.

Las pinzas pueden equiparse con diferentes sensores para aumentar la seguridad del operador (Fig. 12.9). Los sensores capacitivos se utilizan para la detección temprana del operador y, por lo tanto, para la prevención de contactos no deseados. Los sistemas de cámaras pueden detectar los alrededores del robot y ayudar en la búsqueda de objetos. Los sensores táctiles se utilizan para diferenciar entre la pieza de trabajo y el operador. Para establecer la fuerza de agarre adecuada, se pueden integrar diferentes sensores de fuerza. El diseño de la pinza también puede incluir diferentes interfaces de usuario, como una pantalla LCD, luces de señalización y botones de control.

Las pinzas utilizadas en los sistemas de robots colaborativos deben ser fáciles de instalar y programar. El futuro diseño de las pinzas tiende a alejarse de la programación del usuario hacia pinzas que serán capaces de adaptarse automáticamente dependiendo de las piezas y aplicaciones.

12.5 Aplicaciones del Sistema Robótico Colaborativo

El documento ISO 10218-2:2011 proporciona la división de aplicaciones colaborativas en cinco categorías presentadas en la Fig. 12.10.

La aplicación de la ventana de entrega (ver Fig. 12.10a) cubre las tareas de carga/descarga, prueba, banco, limpieza y servicio. El robot se coloca detrás de dispositivos fijos o

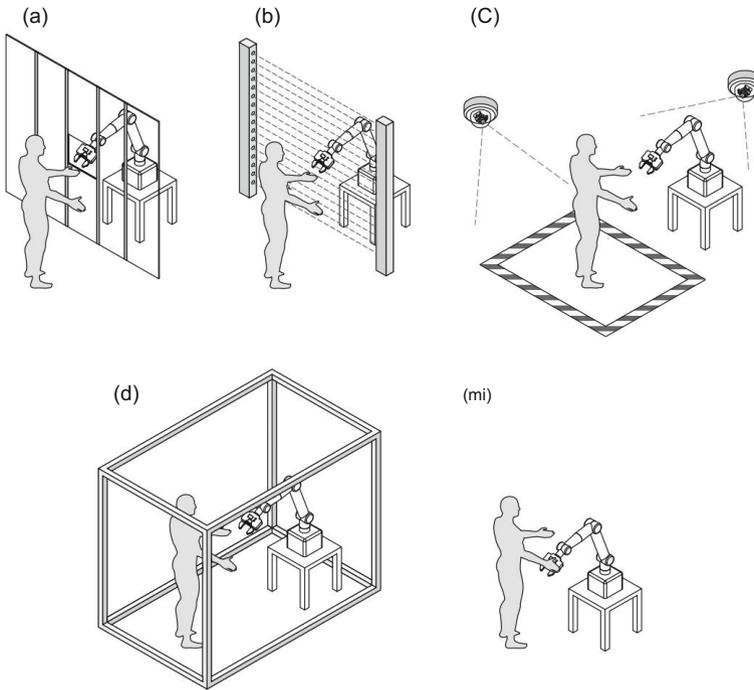


Fig. 12.10 Aplicaciones conceptuales de robots colaborativos: a ventana de entrega, b ventana de interfaz, c espacio de trabajo colaborativo, d inspección y e robot guiado a mano (ISO 10218-2:2011)

guardas sensibles alrededor del espacio de trabajo donde la aplicación se realiza en modo automático sin limitaciones. La interacción con el operador se realiza a través de un ventana. En las proximidades de la ventana, el robot reduce su velocidad. La ventana también actúa como el límite para el espacio de trabajo del robot.

La ventana de interfaz (Fig. 12.10b) actúa como una barrera para el sistema de robot. Sobre el lado del robot, el robot puede realizar operaciones automáticas autónomas. El sistema de robots también está vigilado por guardas fijos o sensibles alrededor del espacio de trabajo. el robot se detiene en la ventana de la interfaz y luego se puede mover manualmente fuera de la interfaz. Para movimiento guiado el robot debe estar equipado con un dispositivo de guía manual. Este método se utiliza para apilamiento automático, ensamblaje guiado, llenado guiado, prueba, banco, y limpieza

Las aplicaciones que incluyen ensamblaje y manejo simples pueden aprovechar las ventajas de la espacio de trabajo colaborativo (Fig. 12.10c). Dentro del espacio de trabajo común, el robot puede realizar operaciones automáticas. Cuando el operador ingresa al espacio de trabajo colaborativo, el robot reduce la velocidad y/o se detiene. En este tipo de aplicación, se necesitan sistemas adicionales de detección de personas que utilicen uno o más sensores.

Las aplicaciones que incluyen inspección y ajuste de parámetros (p. ej., aplicación de soldadura, consulte la figura 12.10d) requieren un espacio de trabajo protegido y sistemas de detección de personas.

Cuando el operador ingresa al espacio de trabajo compartido, el robot continúa operando con Velocidad reducida. La aplicación debe tener medidas adicionales para evitar el mal uso.

Los robots guiados a mano (Fig. 12.10e) se utilizan para aplicaciones guiadas a mano (p. ej., montaje o pintura). El robot está equipado con un dispositivo de guía manual. El operador guía el robot a mano a lo largo de un camino en un espacio de trabajo específico de la tarea con reducción de velocidad. El área del espacio de trabajo colaborativo depende principalmente de los peligros de la aplicación requerida.

Capítulo 13

Robots Móviles



Un robot móvil es un dispositivo que es capaz de moverse. Tiene la capacidad de moverse por su entorno utilizando ruedas, orugas, patas o una combinación de ellas. También puede volar, nadar, gatear o rodar. Los robots móviles se utilizan para diversas aplicaciones en fábricas (vehículos guiados automáticamente), hogares (dispositivos de limpieza de pisos), hospitales (transporte de alimentos y medicamentos), en agricultura (recolección de frutas y verduras, fertilización, siembra), para militares y búsqueda, y operaciones de rescate. Abordan la demanda de manejo flexible de materiales, el deseo de que los robots puedan operar en estructuras grandes y la necesidad de reconfigurar rápidamente las áreas de trabajo.

Aunque los robots móviles se mueven de diferentes maneras, el enfoque de este capítulo estará en los dispositivos que usan ruedas para la locomoción (los robots que caminan se presentan en el Capítulo 14). En aplicaciones industriales, los vehículos de guiado automático (AGV) son de especial interés para mover materiales alrededor de una planta de fabricación o un almacén. Los remolcadores suelen tirar de carros (Fig. 13.1a), los cargadores unitarios usan una plataforma plana para transportar una unidad de carga apilada en la plataforma (Fig. 13.1b) y los montacargas móviles se usan para recoger y dejar cargas automáticamente desde varias alturas (Fig. 13.1c). Los AGV generalmente siguen marcadores o cables en el piso, o usan visión, imanes o láser para moverse por la instalación.

Este movimiento organizado se llama navegación; un proceso o actividad para planificar y dirigir un robot a lo largo de una ruta o camino para moverse con seguridad de un lugar a otro sin perderse o chocar con otros objetos.

La navegación suele ser una tarea compleja que consiste en la localización, la planificación de rutas y el control de movimiento. La localización denota la capacidad del robot para establecer su propia posición y orientación dentro del marco de coordenadas global. La planificación de ruta autónoma representa la determinación de una ruta libre de colisiones para un robot entre las posiciones de inicio y de destino entre los obstáculos abarrotados en un espacio de trabajo. Esto también incluye interacciones entre robots móviles y humanos y entre grupos de robots móviles. El control de movimiento debe garantizar la ejecución del movimiento a lo largo de la ruta planificada con la evitación simultánea de obstáculos.

En entornos colaborativos, los humanos y los robots comparten un espacio de trabajo, lo que genera la necesidad de mejorar la comunicación entre humanos y robots y de que los robots sean conscientes de las personas que los rodean. El robot normalmente debe mantener una distancia segura de las personas. Sin embargo, dispositivos como

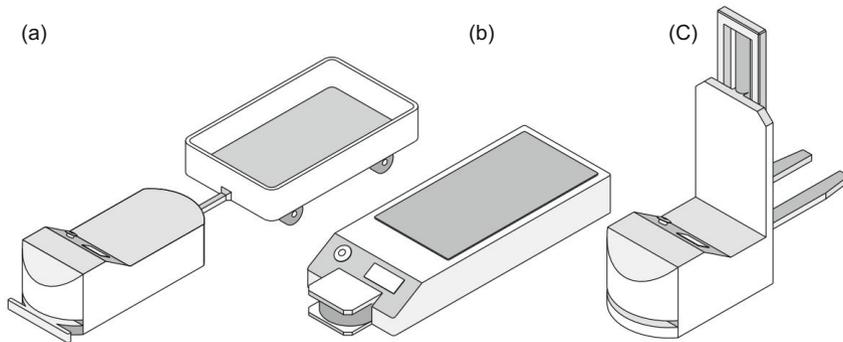


Fig. 13.1 Vehículos de guiado automático: a Remolcador, b cargador unitario y c montacargas móvil

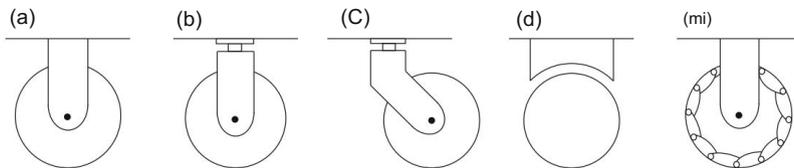


Fig. 13.2 Diseños de ruedas: a rueda fija estándar, b rueda direccional estándar, c rueda giratoria, d rueda esférica, y e rueda sueca

robots de cuidado personal, requieren una estrecha proximidad entre el ser humano y el robot y estas máquinas son ejemplos de sistemas interactivos humanos-robots avanzados.

13.1 Cinemática del robot móvil

Con su diseño mecánico simple, la rueda es el mecanismo de locomoción más popular en la robótica móvil. Las ruedas proporcionan tracción y tres ruedas garantizan estabilidad. equilibrio de robots Las ruedas se pueden diseñar en diferentes formas, como se muestra en la Fig. 13.2.

La rueda fija, la rueda direccional estándar y la rueda giratoria tienen un eje de rotación y son direccionales. No es posible el movimiento en otra dirección sin primero girar el volante alrededor del eje vertical. La rueda esférica es omnidireccional, ya que permite el movimiento en todas las direcciones sin tener que girar primero. El La rueda sueca intenta lograr un comportamiento omnidireccional con rodillos pasivos adjuntos alrededor de la circunferencia de la rueda. Así, la rueda puede moverse a lo largo de diferentes trayectorias, así como hacia delante y hacia atrás.

Selección del tipo de rueda, número de ruedas, así como su fijación al robot El chasis afecta significativamente la cinemática del robot móvil. Ejemplos de diseños cinemáticos se muestran en la Fig. 13.3. Van desde configuraciones de dos ruedas a cuatro ruedas. Las dos plataformas de la columna de la derecha son omnidireccionales.

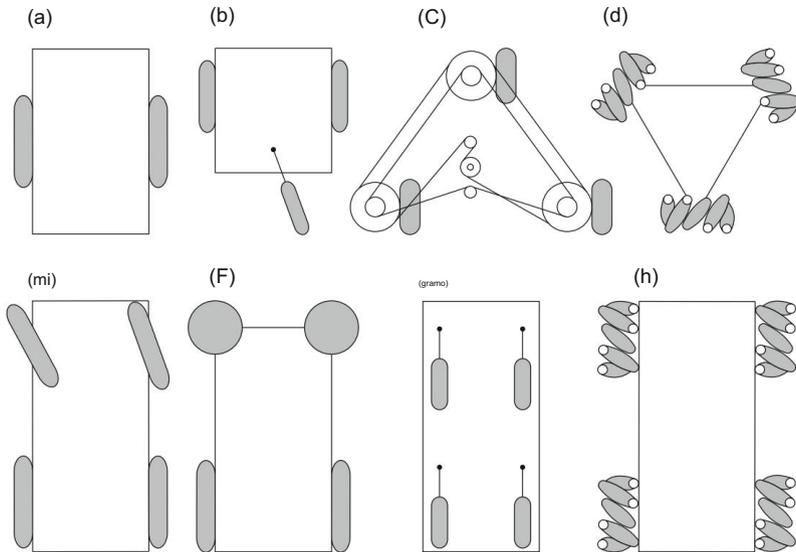


Fig. 13.3 Ejemplos de configuración de robots móviles: a accionamiento diferencial de dos ruedas, b accionamiento diferencial con rueda orientable, c tres ruedas direccionales y motorizadas sincrónicamente, d tres omnidireccionales ruedas en triángulo, e cuatro ruedas con dirección tipo automóvil, f dos ruedas de tracción diferencial y dos ruedas omnidireccionales, g cuatro ruedas giratorias direccionales y motorizadas, y h cuatro ruedas omnidireccionales en configuración rectangular

Para fines de análisis, un robot móvil se representará como un cuerpo rígido en Ruedas que solo pueden moverse en un plano horizontal. Con estos supuestos la pose del robot se puede definir con tres coordenadas, dos que representan la posición en el plano horizontal y otro que describe la orientación alrededor del eje vertical. Relaciones se presentan en la Fig. 13.4 para un mecanismo de accionamiento diferencial simple. Ejes xG y yG definir el marco de coordenadas global. El marco de coordenadas locales del robot se define con ejes xm e ym . El eje xm apunta en la dirección de avance del robot.

La posición y orientación del robot se definen con el siguiente vector

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (13.1)$$

donde las coordenadas x e y definen la posición del robot en relación con la coordenada global marco y ángulo θ determina su orientación (rotación alrededor del eje vertical). Robot la orientación se puede describir también en forma de matriz de rotación

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13.2)$$

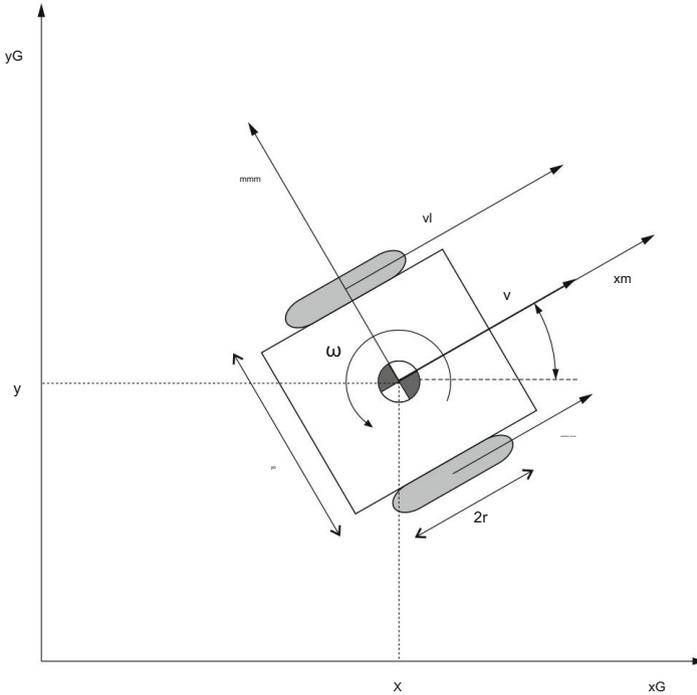


Fig. 13.4 Posición y orientación de un robot móvil: ejemplo de robot de accionamiento diferencial

La matriz de transformación homogénea que describe la pose del robot móvil es entonces

$$T = \begin{pmatrix} \cos & -\text{sen} & 0 & x \\ \text{sen} & \cos & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13.3)$$

El robot de accionamiento diferencial presentado en la figura 13.4 tiene una estructura mecánica simple. Su movimiento se basa en dos ruedas accionadas por separado unidas a cada lado del cuerpo del robot. El robot cambia su dirección variando la velocidad relativa de rotación de sus ruedas. Por lo tanto, no requiere un movimiento de dirección adicional. Si las ruedas se mueven en la misma dirección y con la misma velocidad, el robot seguirá una línea recta. Si las ruedas giran con la misma velocidad en direcciones opuestas, el robot girará alrededor del punto medio entre las ruedas. En general, el centro de rotación del robot puede estar en cualquier lugar de la línea a través de los ejes de las ruedas y dependerá de la velocidad de rotación de cada rueda y su dirección.

Con su cinemática simple, es un modelo ideal para estudiar el movimiento de los robots. Al representar el ancho del robot (distancia entre los puntos de contacto del neumático con el suelo) con l y el radio de la rueda con r , se puede analizar el movimiento del robot. Las ruedas giran con

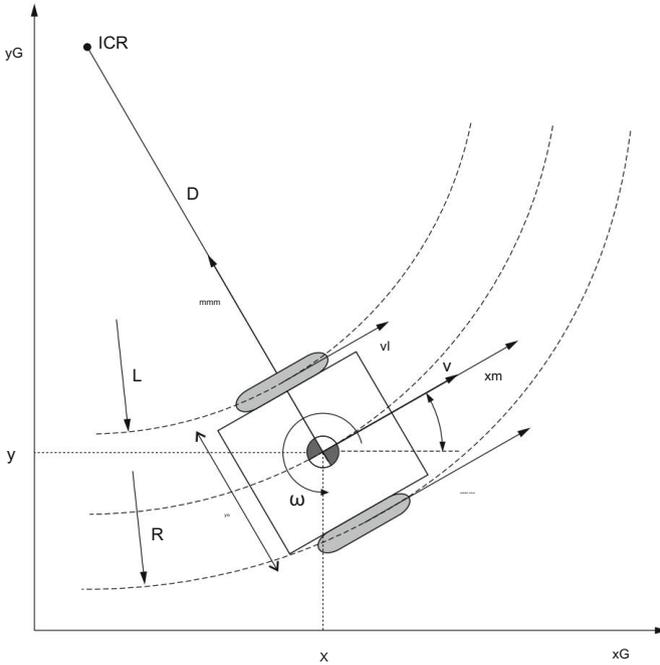


Fig. 13.5 Cinemática del robot de accionamiento diferencial

velocidades angulares ω_r (rueda derecha) y ω_l (rueda izquierda), lo que da como resultado velocidades de rueda v_r y v_l de la rueda derecha e izquierda, respectivamente

$$\begin{aligned} v_r &= \omega r_r, \\ v_l &= \omega l_r. \end{aligned} \quad (13.4)$$

Las rotaciones de las dos ruedas dan como resultado la velocidad de traslación del robot a lo largo del eje x_m del robot y la velocidad angular alrededor de su eje vertical. Con referencia a la figura 13.5, la velocidad angular se puede definir como

$$\omega = \frac{v_l}{r_l - r_r} = \frac{v_r}{D + r_r}, \quad (13.5)$$

donde D es la distancia entre el punto medio del robot (en este caso el origen del marco x_m - y_m) y el punto que define el centro instantáneo de rotación (ICR). El ICR es el punto en el plano horizontal alrededor del cual gira el robot en un instante de tiempo específico. De la igualdad en (13.5) se puede derivar la siguiente relación

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{y_0} = \frac{r}{y_0} (\omega_r - \omega_l). \quad (13.6)$$

Entonces, la velocidad de traslación a lo largo del eje x_m se puede determinar como

$$v = \omega D = 2 \frac{vr + vl}{2} = \frac{r}{2} (\omega r + \omega l). \quad (13.7)$$

Las ecuaciones (13.6) y (13.7) definen las relaciones entre las velocidades angulares de las ruedas y la velocidad del robot móvil. Sin embargo, desde la perspectiva del control, es la relación inversa más relevante la que define las velocidades angulares de las ruedas a partir de la velocidad deseada del robot.

Combinando (13.6) y (13.7) se obtienen las siguientes relaciones

$$\begin{aligned} \omega r &= \frac{2v + \omega l}{2r}, \\ \omega l &= \frac{2v - \omega r}{2r}. \end{aligned} \quad (13.8)$$

La velocidad del robot determinada como un par $[v, \omega]$ se define en relación con el marco de coordenadas local del robot móvil x_m-y_m . La velocidad del robot en el marco de coordenadas globales x_G-y_G definido como la derivada del tiempo del vector de posición del robot x (13.1) se puede calcular rotando la velocidad expresada localmente usando la matriz de rotación R (13.2) como

$$\begin{pmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \\ v \sin \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \cos & -\sin & 0 & 0 & 0 \\ \sin & \cos & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \omega & \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega \\ \omega \end{pmatrix} \quad (13.9)$$

Combinando las partes de traslación y rotación de las ecuaciones anteriores y omitiendo los elementos que son cero, la velocidad del robot móvil en el marco de coordenadas global se puede escribir como

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} v \cos \\ v \sin \\ \omega \end{pmatrix} \quad (13.10)$$

De la ecuación (13.10) está claro que las cantidades relevantes para describir el movimiento de un robot móvil son la velocidad de traslación a lo largo del eje v del eje x_m , la velocidad de rotación alrededor del eje vertical ω y la orientación del robot con respecto al marco de coordenadas global. Con esto en mente, podemos simplificar aún más el robot de accionamiento diferencial en un modelo de monociclo (como se muestra en la figura 13.6). Ahora, las tres cantidades antes mencionadas describen el movimiento del monociclo representado como una sola rueda con marcada dirección hacia adelante en el medio del robot de accionamiento diferencial en la figura 13.6. El monociclo se puede volver a transformar fácilmente en el robot de accionamiento diferencial según la ecuación (13.8).

La propiedad atractiva del modelo de monociclo es su simplicidad. Por lo tanto, se utilizará a lo largo de este capítulo para el análisis. Sin embargo, el modelo se puede volver a convertir en general en cualquier otro robot móvil cinemáticamente más complejo. Como ejemplo, revisamos una plataforma móvil basada en el principio de dirección de un automóvil que se muestra en la figura 13.7.

La geometría de la dirección del automóvil resuelve el problema de las ruedas en el interior y exterior de un giro que necesitan trazar círculos de diferentes radios. Por lo tanto, los ángulos de dirección de las ruedas delanteras izquierda y derecha son diferentes. En el modelo de monociclo, la orientación del monociclo se define con un ángulo, el mismo que la orientación del robot de accionamiento diferencial.

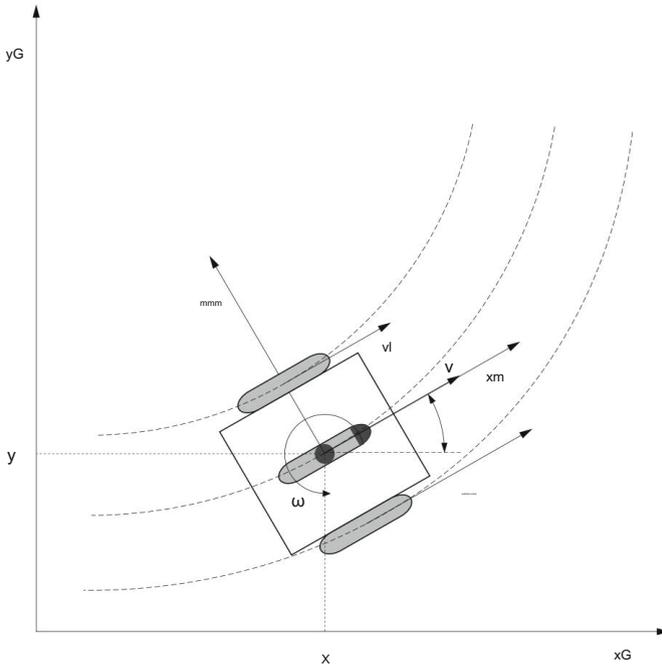


Fig. 13.6 Modelo monociclo de un robot móvil de accionamiento diferencial

En el problema similar a un automóvil, la orientación del robot móvil está definida por el ángulo ψ . El modelo de monociclo se coloca en el medio de las ruedas delanteras y su orientación se define para lograr el mismo centro de rotación instantáneo definido por la orientación de las ruedas izquierda y derecha del automóvil. El monociclo es ahora la tercera rueda delantera y el ICR está colocado en el punto de intersección de las tres líneas perpendiculares a las ruedas delanteras. El ángulo ψ ahora se define como la desviación de la orientación del monociclo desde el eje x_m del robot (como se muestra en la Fig. 13.7). Al calcular el ángulo ψ , se establecerá la relación entre el robot similar a un automóvil y el monociclo.

Siguiendo el mismo principio que en (13.7), la velocidad de traslación del monociclo puede ser definido como

$$v = D\omega, \quad (13.11)$$

donde D es la distancia entre el monociclo y el ICR. La distancia D se puede calcular como

$$re = \frac{v}{\omega}. \quad (13.12)$$

La curvatura de trayectoria para el monociclo K_u se puede definir como la inversa del radio de rotación instantáneo como

$$K_u = \frac{1}{D} = \frac{\omega}{v}. \quad (13.13)$$

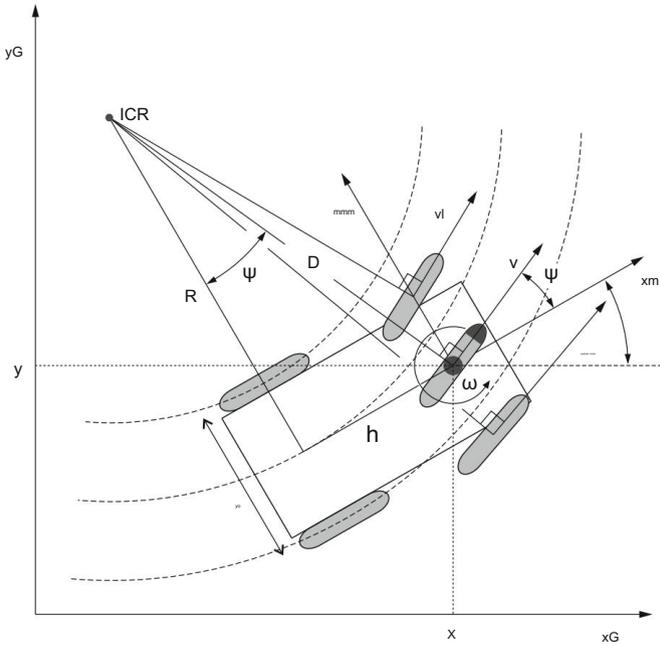


Fig. 13.7 Modelo de monociclo del robot móvil de dirección similar a un automóvil

Al considerar la cinemática del automóvil, se puede escribir la siguiente relación a partir de la figura 13.7.

$$h = D \operatorname{sen} \psi, \quad (13.14)$$

donde el ángulo ψ es también el ángulo entre las líneas D y R (la distancia entre ICR y el punto medio entre las ruedas traseras del vehículo) y h es la distancia entre el centro del monociclo y el punto medio entre las ruedas traseras del vehículo. robot. La distancia D se puede calcular como

$$re = \frac{h}{\operatorname{pecado} \psi} \quad (13.15)$$

y la curvatura para el automóvil K_c se define entonces como

$$K_c = \frac{1}{D} = \frac{\operatorname{sen} \psi}{h}. \quad (13.16)$$

Con K_c y K_u iguales se puede obtener la siguiente relación

$$K_c = K_u \quad \operatorname{sen} \psi = \frac{\omega l}{v}. \quad (13.17)$$

Finalmente, el ángulo ψ es igual a

$$\psi = \arccos \frac{\omega l}{v} \quad (13.18)$$

El ángulo ψ es el ángulo de dirección deseado para el automóvil y se puede calcular a partir de la velocidad conocida v , la velocidad angular ω y el ancho del automóvil l .

Con la relación definida entre el monociclo y un robot móvil con otra cinemática, el análisis puede basarse en un modelo de monociclo simple y generalizarse al otro robot.

13.2 Navegación

Los robots móviles a menudo operan en entornos desconocidos y no estructurados y necesitan autolocalizarse, planificar un camino hacia un objetivo, construir e interpretar el mapa del entorno y luego controlar su movimiento a través de ese entorno.

13.2.1 Localización

Una diferencia importante entre un manipulador y un robot móvil es la estimación de la posición. Un manipulador tiene una base fija y midiendo las posiciones de las articulaciones del robot y conociendo su modelo cinemático es posible determinar la pose de su efector final. Un robot móvil puede moverse como una unidad a través del entorno y no existe una forma directa de medir su posición y orientación. Una solución general es estimar la posición y la orientación del robot mediante la integración del movimiento (velocidad) a lo largo del tiempo.

Sin embargo, normalmente se requieren enfoques más precisos y, a menudo, también más complejos. Si el mapa del entorno se conoce de antemano, se pueden planificar previamente las rutas de los robots móviles. Esto es especialmente útil cuando el entorno es relativamente estático y se requiere un funcionamiento robusto, como en aplicaciones industriales. Los enfoques más complejos se basan en la planificación dinámica de rutas en función de la información de los sensores y el reconocimiento de características en el entorno. El robot primero determina su propia posición y planifica su movimiento a través de áreas transitables. Cuando el espacio de trabajo o las tareas cambian con frecuencia, normalmente es mejor planificar de forma dinámica. A menudo se requiere una compensación entre la planificación previa y la generación dinámica de planes. Para simplificar la tarea, se pueden colocar marcadores en el entorno. Estos marcadores pueden reconocerse fácilmente mediante sensores en el robot y proporcionan una localización precisa.

Los vehículos de guiado automático en entornos industriales utilizan varias tecnologías de navegación/guado: cinta magnética, cable, punto magnético, láser y natural.

La localización y la planificación de rutas a menudo se basan en cables electrificados incrustados en el suelo mediante guía inductiva. Un sensor de trayectoria de guía está montado en el vehículo. El alambre puede ser reemplazado por cinta magnética o una línea pintada (Fig. 13.8a). En lo último

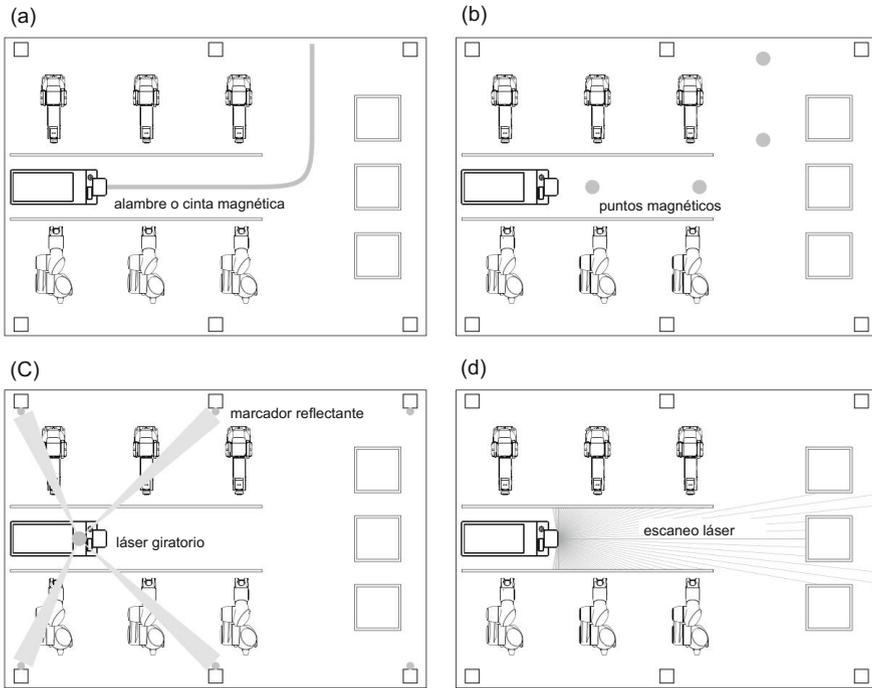


Fig. 13.8 Disco de abstracción del sensor del conjunto de sensores a bordo del robot

caso de que el robot utilice una cámara para determinar su posición relativa a la línea del suelo. Los caminos son fijos y continuos. Se pueden colocar marcadores únicos a lo largo de la línea para indicar posiciones específicas. En lugar de colocar líneas y marcadores en el suelo, también se pueden colocar marcadores (patrones bidimensionales) en el techo para que los identifique una cámara integrada. La guía de puntos magnéticos utiliza una ruta marcada con discos magnéticos (Fig. 13.8b).

Los caminos son abiertos y cambiantes.

Las técnicas de localización basadas en el suelo a menudo se reemplazan por métodos basados en láser. Los métodos de triangulación láser, en los que un láser giratorio detecta el alcance y el acimut de los reflectores montados en la pared, proporcionan información de localización precisa sin necesidad de seguir líneas específicas en el suelo. La tecnología de guía láser utiliza múltiples puntos de referencia fijos (tiras reflectantes) ubicados dentro del área de operación que pueden ser detectados por un cabezal láser montado en el vehículo (Fig. 13.8c). Como la instalación está mapeada de antemano, las rutas se pueden cambiar y ampliar fácilmente.

La navegación natural se basa en la información del entorno existente escaneada por escáneres láser, con la ayuda de algunos puntos de referencia fijos (Fig. 13.8d). El área está mapeada con anticipación. La navegación natural es flexible y prescindible. Es adecuado para entornos que cambian con frecuencia pero no de manera significativa. En espacios confinados, el robot puede seguir la pared a través del entorno basándose en el rango de la pared.

También se están introduciendo sistemas de posicionamiento en interiores basados en radio que permiten la localización de robots de manera similar al sistema de posicionamiento global en exteriores. La localización se basa en la triangulación con balizas fijas montadas en la instalación y el sensor montado en el robot. Las distancias se calculan midiendo el tiempo de viaje de las ondas de radio desde la baliza hasta el sensor.

13.2.1.1 Odometría

Un enfoque simple y de uso común para la localización de robots es confiar en la odometría, que utiliza información de sensores de movimiento (generalmente codificadores de ruedas) para estimar el cambio de posición a lo largo del tiempo. Estos cambios de posición se acumulan utilizando principios de integración que proporcionan la posición del robot en relación con una ubicación inicial. El método es sensible a errores debido a la integración de mediciones de velocidad a lo largo del tiempo para dar estimaciones de posición.

El análisis del movimiento del robot comienza con la comprensión de la contribución de cada rueda a la velocidad del robot. Para el caso específico de un robot de accionamiento diferencial, estas relaciones se definen en (13.6) y (13.7). La velocidad de la rueda se puede medir directamente usando un tacómetro. Si dicho sensor no está disponible, la velocidad se puede estimar a través de la diferenciación numérica de la posición obtenida de los codificadores.

En tal caso, las velocidades de las ruedas derecha e izquierda se pueden calcular como

$$\begin{aligned} 2\pi r \frac{nr(t) - nr(t - \Delta t)}{N\Delta t} &= v_r, \\ 2\pi r \frac{nl(t) - nl(t - \Delta t)}{N\Delta t} &= v_l, \end{aligned} \quad (13.19)$$

donde r es el radio de la rueda, N es la resolución del codificador en términos de cuentas por revolución, nr y nl son cuentas del codificador de la rueda derecha e izquierda en el tiempo t , respectivamente, y $nr(t - \Delta t)$ y $nl(t - \Delta t)$ son las mismas cantidades en el tiempo de muestreo anterior.

La posición y la orientación del robot se pueden estimar con integración numérica de la ecuación (13.10) y consideración de (13.6) y (13.7) como

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t - \Delta t) + v \cos \theta \Delta t = x(t - \Delta t) + \cos \theta \Delta t \frac{vr + vl}{2}, \\ y(t) &= y(t - \Delta t) + v \sin \theta \Delta t = y(t - \Delta t) + \sin \theta \Delta t \frac{2vr + vl}{2}, \\ \theta(t) &= \theta(t - \Delta t) + \omega \Delta t = \theta(t - \Delta t) + \Delta t \frac{vr - vl}{2r}. \end{aligned} \quad (13.20)$$

Diferentes factores reducen la eficacia de los métodos basados en la odometría para la estimación de la posición del robot. Un factor muy importante es el deslizamiento de las ruedas que reduce significativamente la precisión de la estimación de la posición. El rendimiento puede mejorarse utilizando modelos de los errores y del vehículo. Se pueden usar puntos de piso o imanes para corregir los errores de odometría que se acumulan entre estos puntos. La odometría también puede

aumentarse con mediciones basadas en sensores de láseres, cámaras, sistemas de identificación por radiofrecuencia y balizas.

13.2.1.2 Localización y mapeo simultáneos

Los sistemas más avanzados utilizan algoritmos que realizan las subtarefas de navegación (localización, planificación de rutas) simultáneamente. El enfoque que se ocupa del problema de construir un mapa de un entorno desconocido por un robot móvil mientras que al mismo tiempo navega por el entorno usando el mapa se denomina localización y mapeo simultáneos (SLAM). Al observar las mismas características en múltiples vistas usando sensores que se mueven con el vehículo, el algoritmo SLAM acumula y combina la información del sensor. Al combinar la estimación de la posición del robot con la información recopilada, se puede construir un mapa local uniendo los datos disponibles. Con el tiempo, se puede mapear el entorno completo y los mapas se pueden usar para planificar las rutas de los robots.

SLAM consta de varias partes, como la extracción de puntos de referencia, la asociación de datos, la estimación de estado, la actualización de estado y la actualización de puntos de referencia. Hay muchas maneras de resolver cada una de las partes más pequeñas, pero están más allá del alcance de este libro.

13.2.1.3 Disco de abstracción del sensor

Cuando el robot móvil se desplaza por el entorno, también debe observar su entorno. Los sensores a bordo del robot buscan obstáculos u objetos inesperados en el camino del vehículo y el robot puede planificar un camino alrededor de ellos antes de regresar a la ruta planificada previamente. Un conjunto típico de sensores incluye sensores de proximidad infrarrojos, sensores de distancia ultrasónicos, escáneres láser, visión, detección táctil y sensores de posicionamiento global. Los sensores se colocan estratégicamente a bordo del robot y alrededor de su circunferencia. Cada sensor proporciona información diferente en términos de cantidad, calidad, rango y resolución. Sin embargo, normalmente la información de todos los sensores se combina para proporcionar una imagen precisa del entorno del robot. Sin tratar específicamente con el análisis de sensores individuales y la integración de la información sensorial, es posible suponer que la distancia y la dirección a todos los obstáculos desde la perspectiva del robot se pueden obtener del conjunto de sensores. El disco de abstracción del sensor presentado en la Fig. 13.9 es un ejemplo de integración sensorial que proporciona información sobre los obstáculos dentro del radio del disco alrededor del robot.

A partir de la posición (x, y) conocida y la orientación θ del robot y de lo conocido es posible determinar la posición del obstáculo (x_o, y_o) en el marco de coordenadas global como

$$\begin{aligned} x_o &= x + d_o \cos(\theta + \alpha), \\ y_o &= y + d_o \sin(\theta + \alpha). \end{aligned} \quad (13.21)$$

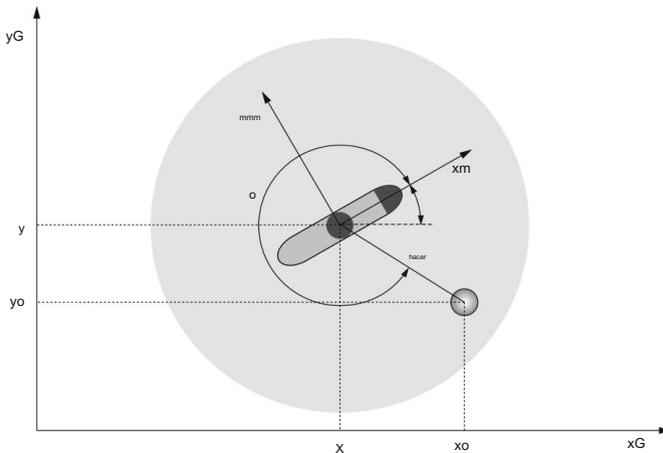


Fig. 13.9 Disco de abstracción del sensor del conjunto de sensores a bordo del robot

El siguiente análisis se basará en los supuestos de un modelo de robot monociclo y la información sobre los objetos obtenida del disco de abstracción del sensor.

13.2.2 Planificación de rutas

La planificación de rutas permite a los robots móviles autónomos seguir una ruta óptima sin colisiones desde la posición inicial hasta la meta sin chocar con obstáculos en el área del espacio de trabajo. Un planificador de ruta ideal debe ser capaz de manejar las incertidumbres en el modelo del mundo detectado, minimizar el impacto de los objetos en el robot y encontrar la ruta óptima en un tiempo mínimo, especialmente si la ruta se va a negociar regularmente. En general, la planificación de la ruta debe resultar en la ruta con el menor costo posible, debe ser rápida y robusta, así como genérica con respecto a los diferentes mapas.

Hay diferentes algoritmos disponibles para la planificación de rutas (en tiempo real). Un método simple consiste en combinar segmentos de línea recta conectados con vértices. Otro método de búsqueda estándar para encontrar la ruta óptima es el algoritmo A* con sus modificaciones. El algoritmo encuentra una ruta dirigida entre múltiples puntos, llamados nodos. El entorno del robot representado con un mapa se puede descomponer en espacios libres y ocupados. Entonces se puede realizar una búsqueda A* para encontrar un camino lineal por tramos a través de los nodos libres.

Se puede utilizar un algoritmo de campo potencial artificial para evitar obstáculos. El algoritmo usa campos de potencial repulsivo alrededor de los obstáculos para alejar al robot sujeto a este potencial y usa un campo de potencial atractivo alrededor de la meta para atraer al robot hacia la meta. Los campos repulsivos y atractivos modifican la trayectoria del robot. El algoritmo permite operaciones en tiempo real de un robot móvil en un entorno complejo.

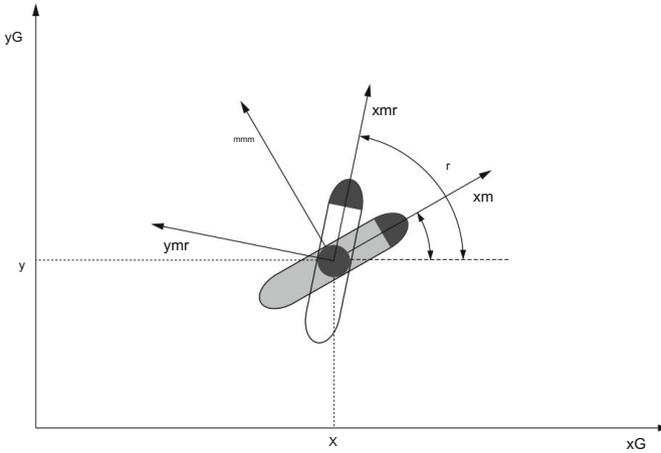


Fig. 13.10 Control de orientación del monociclo; el monociclo gris representa el robot real y el monociclo blanco representa la orientación deseada

13.2.3 Control de ruta

Para completar la tarea, el robot móvil debe moverse desde su ubicación inicial hasta la posición y orientación finales deseadas. Se requiere un sistema de control para controlar el vehículo a lo largo de su camino.

13.2.3.1 Control de Orientación

Con base en el modelo de monociclo presentado en la figura 13.10, primero se considerará el control de la orientación. Un enfoque similar sería válido para los robots móviles que pueden cambiar de orientación sin cambiar su posición (un robot de accionamiento diferencial es un vehículo de este tipo, pero el automóvil no lo es).

El objetivo del control es minimizar el error de orientación.

$$\tilde{\theta} = \theta_r - \theta_r \quad (13.22)$$

donde θ_r es la orientación deseada y θ_r es la orientación real. Suponemos que el control se basa en el enfoque de control proporcional-integral-derivativo (PID)

$$\text{PID}(\tilde{\theta}) = K_p \tilde{\theta} + K_i \int \tilde{\theta} dt + K_d \dot{\tilde{\theta}} \quad (13.23)$$

o una de sus subversiones, como el controlador proporcional-derivativo. Entonces, la velocidad angular deseada del robot móvil se puede calcular como

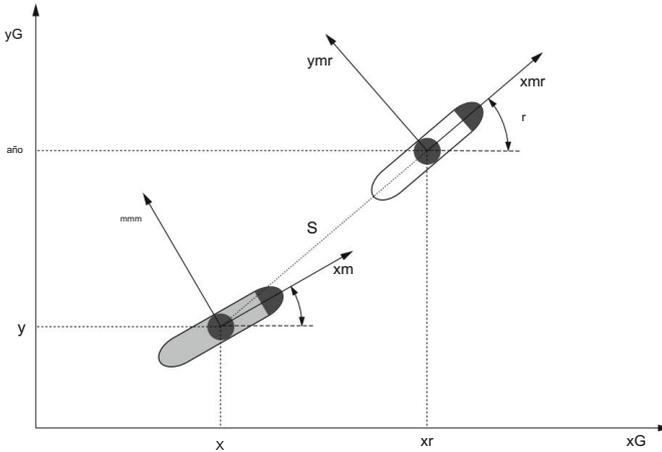


Fig. 13.11 Control de posición y orientación del monociclo; el moniciclo gris representa el robot real y el moniciclo blanco representa la ubicación del objetivo

$$\omega = K_p \tilde{\theta} + K_i \int \tilde{\theta} dt + K_d \dot{\tilde{\theta}} \quad (13.24)$$

Cabe señalar que los ángulos son funciones periódicas y si asumimos la configuración

$$r = 0 \quad \theta = 2\pi \quad \theta_r = -2\pi, \quad (13.25)$$

el robot girará una vez antes de alcanzar la orientación final. Por lo general, este no es el comportamiento deseable del robot. Por lo tanto, el error de orientación debe limitarse de tal manera que requiera una rotación máxima de π radianes en cualquier dirección.

$$\tilde{\theta} \in [-\pi, \pi]. \quad (13.26)$$

Una solución simple es usar una función arctan de cuatro cuadrantes como

$$\tilde{\theta} = \arctan(\frac{\sin \theta_r}{\cos \theta_r}) \in [-\pi, \pi]. \quad (13.27)$$

Con la combinación de (13.27) y (13.24) el robot alcanzará la orientación deseada sin girar más de medio círculo en sentido positivo o negativo.

13.2.3.2 Control de Posición y Orientación

El robot móvil generalmente se mueve desde su ubicación inicial hasta su ubicación final (objetivo), lo que requiere un cambio de posición y orientación. Dado que el robot necesita moverse a la ubicación de su objetivo, nos referiremos a esta tarea como ir a la meta. La figura 13.11 representa tal

condiciones. El cuadro de coordenadas $x_m - y_m$ define la pose actual del robot y el cuadro $x_{mr} - y_{mr}$ define la pose de destino. El segmento de línea S representa el camino más corto para completar la tarea.

La orientación deseada del robot para completar la tarea se puede definir como el ángulo entre el segmento de línea S y el eje horizontal del marco de coordenadas global. Con la posición deseada conocida (x_r, y_r) y la posición actual del robot (x, y) , el ángulo r se puede calcular en cada instante de tiempo durante el movimiento del robot como

$$r = \arctan \frac{y_r - y}{x_r - x}. \quad (13.28)$$

Suponiendo que el robot se mueve a una velocidad de avance constante v_0 , el movimiento del robot en el marco de coordenadas global se puede describir con el siguiente conjunto de ecuaciones

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_0 \cos r, \\ \dot{y} &= v_0 \sin r, \\ \dot{r} &= \omega = \text{PID}(r). \end{aligned} \quad (13.29)$$

Con este enfoque, el objetivo del control es mantener constante la velocidad v_0 y seguir el ángulo deseado r calculado a partir de (13.28). Si asumimos un robot de accionamiento diferencial, las velocidades angulares de las ruedas se pueden calcular a partir de (13.8) como

$$\begin{aligned} \omega_r &= \frac{2v_0 + \omega l}{2r}, \\ \omega_l &= \frac{2v_0 - \omega l}{2r}. \end{aligned} \quad (13.30)$$

Al moverse con velocidad constante v_0 , el robot sobrepasaría su ubicación objetivo. Por lo tanto, es razonable definir la velocidad de avance del robot en función de la distancia a la meta.

$$G = \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2}. \quad (13.31)$$

Con un controlador proporcional, la velocidad deseada se puede definir como

$$vG = KvG, \quad (13.32)$$

donde Kv es la ganancia de velocidad. Las ecuaciones (13.29) se pueden reescribir como

$$\begin{aligned} \dot{x} &= vG \cos r, \\ \dot{y} &= vG \sin r, \\ \dot{r} &= \omega = \text{PID}(r) \end{aligned} \quad (13.33)$$

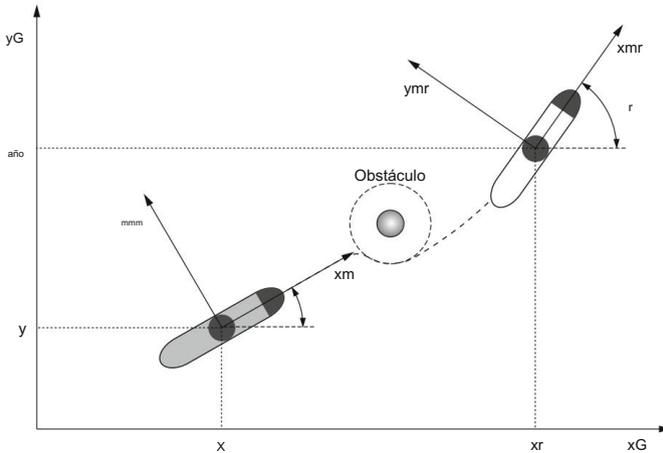


Fig. 13.12 Control de posición y orientación del moniciclo con evitación de obstáculos; el moniciclo gris representa el robot real y el moniciclo blanco representa la ubicación del objetivo; el círculo gris es el obstáculo y la línea circular discontinua es la zona segura alrededor del obstáculo

y en (13.30) v_0 debe ser reemplazado por v_G . Con este enfoque, el robot desacelerará cuando se acerque a la ubicación del objetivo. Dado que la velocidad deseada aumenta con la distancia a la meta, se puede establecer un límite máximo en v_G $[0, v_{Gmax}]$.

13.2.3.3 Evasión de obstáculos

La Figura 13.12 muestra condiciones con un obstáculo en el camino del robot hacia la posición de destino. El robot no puede dirigirse directamente a la ubicación de destino sin evitar primero el obstáculo. Basándonos en el concepto del disco de abstracción del sensor, asumimos que el robot es capaz de detectar y localizar el obstáculo desde una distancia segura y, utilizando esta información, puede planificar actividades para evitarlo. El obstáculo en la figura 13.12 está representado por un círculo gris y la línea circular discontinua alrededor del obstáculo representa una zona segura alrededor del obstáculo. Al robot no se le permitiría entrar en el círculo discontinuo.

Con esto en mente, ahora tenemos dos objetivos de control. El primero es ir a portería y el segundo es evitar obstáculos. En la figura 13.13 se muestra una representación más detallada de los dos objetivos de control, donde d_0 indica la distancia desde el robot hasta el obstáculo, u_g es la variable de control asociada con el objetivo ir a la meta y u_o es la variable de control asociada con evitar -objetivo objetivo. Para completar con éxito la tarea, el u_g debe apuntar a la meta, mientras que el u_o debe apuntar en dirección opuesta al obstáculo. La variable de control real u es el resultado de combinar u_g y u_o .

La parte de control de ir a la meta se puede definir en función de la distancia a la posición de la meta como

$$f_{eo} = k_g \frac{x_r - x}{año - año} \quad (13.34)$$

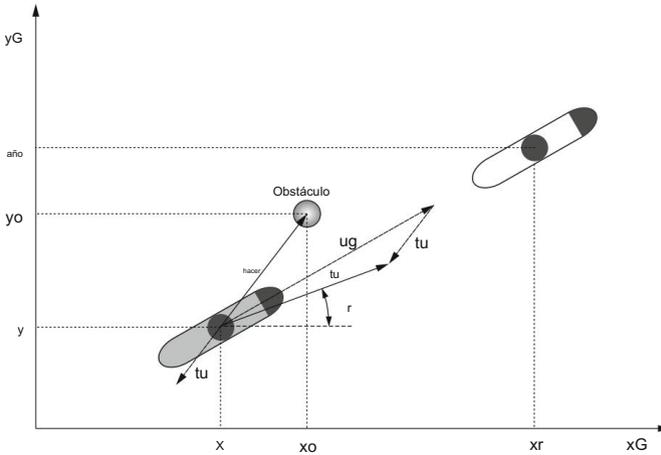


Fig. 13.13 Evasión de obstáculos en monociclo; el monociclo gris representa el robot real, el monociclo blanco representa la ubicación del objetivo y el círculo gris es un obstáculo

Del mismo modo, la variable de control de evitación de obstáculos se puede definir en función de la distancia al obstáculo.

$$\begin{matrix} u_{ox} \\ u_{oy} \end{matrix} = K_o \begin{matrix} x - x_o \\ y - y_o \end{matrix} \quad (13.35)$$

Cabe señalar que u_g apunta a la meta y u_o apunta en dirección opuesta al obstáculo, como se ve en la definición de distancias de las dos ecuaciones anteriores. La combinación de las dos variables de control debe realizarse en función de la distancia al obstáculo, que se define como

$$hacer = \frac{1}{\sqrt{(x_o - x)^2 + (y_o - y)^2}} \quad (13.36)$$

Cuando el robot está lejos del obstáculo, solo necesita dirigirse directamente a la meta. Sin embargo, en las cercanías del obstáculo, la tarea principal se convierte en evitar el obstáculo. Consecutivamente, la combinación se puede implementar como

$$\begin{matrix} u_x \\ u_y \end{matrix} = \lambda(hacer) \begin{matrix} f_{eo} \\ f_{eo} \end{matrix} + (1 - \lambda(hacer)) \begin{matrix} u_{ox} \\ u_{oy} \end{matrix}, \lambda(hacer) \in [0, 1]. \quad (13.37)$$

El parámetro λ puede, por ejemplo, definirse como una función exponencial basada en la de la función al obstáculo $\lambda = \text{distancia}^{-\kappa}$ y el parámetro κ define la tasa de convergencia $1 - e$ hacia 1. Como se ve en la Fig. 13.13, la variable de control u define el robot deseado velocidades en el marco de coordenadas global

$$\begin{matrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{matrix} = \begin{matrix} u_x \\ u_y \end{matrix} \quad (13.38)$$

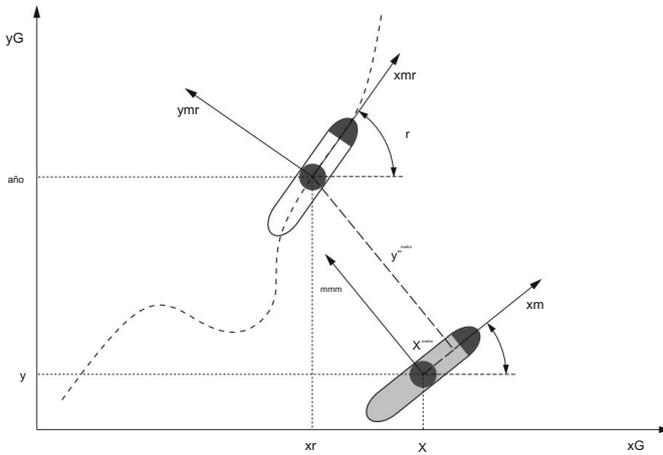


Fig. 13.14 Control de seguimiento de la trayectoria del monociclo; el monociclo gris representa un robot real y el monociclo blanco representa un vehículo virtual en el camino

La orientación deseada del robot se puede calcular como

$$r = \arctan \frac{u_y}{u_x}, \quad (13.39)$$

resultando en la velocidad angular

$$\dot{\alpha} = \omega = \text{PID}(\alpha_r - \alpha). \quad (13.40)$$

La velocidad de avance del robot se puede calcular como

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = v_r \frac{\cos^2 \alpha_r + v_r^2 \sin^2 \alpha_r}{\cos^2 \alpha + v_r^2 \sin^2 \alpha} = u \sqrt{\frac{2^2 + u^2}{x^2 + y^2}}. \quad (13.41)$$

Nuevamente, suponiendo un robot de accionamiento diferencial, las velocidades angulares de las ruedas se pueden calcular a partir de (13.8).

13.2.3.4 Seguimiento de ruta

A menudo, el robot no puede simplemente tomar el camino más corto hacia la meta y debe seguir un camino predefinido. En este caso, el objetivo del control es mantenerse en el camino. La tarea se puede simplificar considerando un vehículo virtual que se mueve a lo largo del camino con una velocidad predefinida. Luego, el objetivo de control se convierte en el seguimiento del vehículo virtual, como se muestra en la figura 13.14.

El error de seguimiento se puede definir como

$$\tilde{x} = x_r - x, \quad (13.42)$$

donde x_r y x representan la posición y orientación del vehículo virtual y el robot móvil, respectivamente.

Todas las cantidades se expresan en el marco de coordenadas global y se pueden transformar en el marco de coordenadas del robot como

$$X^m = \begin{bmatrix} x^m \\ y^m \\ \theta^m \end{bmatrix} = R^{-1} X, \quad (13.43)$$

donde R se define como en (13.2). La velocidad de avance del robot se puede calcular a partir del error de seguimiento a lo largo del eje x^m como

$$v = K_x x^m, \quad (13.44)$$

donde K_x es la ganancia proporcional del controlador. La tasa angular debe tener en cuenta el error de seguimiento del ángulo $\theta^m = \theta - \theta_r$, así como la distancia a la trayectoria y^m . Es decir, cuando el robot se aleja del camino, debe dirigirse hacia el camino. Por lo tanto, el algoritmo de control se convierte en

$$\omega = K_y y^m + K_\theta \theta^m, \quad (13.45)$$

donde K_y y K_θ son ganancias proporcionales del controlador. Dado que se conoce la velocidad del vehículo virtual (la tasa angular se puede calcular como el cambio de dirección tangencial a lo largo de la ruta cuando el vehículo virtual avanza), se puede tener en cuenta como un término de control de avance. Si v_r es la velocidad de avance del vehículo virtual y ω_r su velocidad angular, las Ecs. (13.44) y (13.45) se pueden reescribir con el término feedforward como

$$v = v_r \cos \theta^m + K_x x^m \quad (13.46)$$

y

$$\omega = \omega_r + K_y y^m + K_\theta \theta^m. \quad (13.47)$$

capitulo 14

Robótica Humanoide



Incluso antes de que la robótica moderna comenzara a desarrollarse, los filósofos, ingenieros y artistas estaban interesados en máquinas similares a los humanos. El primer ejemplo conocido de un mecanismo humanoide, cuyo diseño se ha conservado y aún puede reconstruirse hoy en día, es un caballero mecánico creado por Leonardo da Vinci y presentado al gobernante milanés Ludovico Sforza alrededor de 1495. El mecanismo tenía una estructura cinemática similar a Presente robots humanoides y podría moverse por un sistema de cables y poleas. Más recientemente, escritores como Karel Capek e Isaac Asimov pensaron en robots que tienen una forma similar a la de los humanos. Hay varias razones por las que se cree que los robots humanoides son interesantes:

- Los entornos humanos están contruidos para humanos, por lo tanto, un robot de propósito general diseñado para entornos humanos, por ejemplo, hogares, fábricas, hospitales, escuelas, etc., debe tener una forma similar a la de los humanos para operar con éxito en dichos entornos.
- Es más natural para los humanos interactuar y comunicarse con robots que parecen y comportarse como humanos.
- Un robot humanoide puede servir como herramienta experimental para probar las teorías sobre el comportamiento humano creadas por neurocientíficos computacionales, interesados en cómo funciona el cerebro humano.

Se puede decir que la robótica humanoide moderna comenzó con una serie de robots humanoides creados en la Universidad de Waseda en Tokio, Japón. El primero de estos robots fue WABOT-1 creado en 1973.

A pesar de los avances recientes en áreas relacionadas, como la robótica blanda y la inteligencia artificial, los robots humanoides que pueden operar en entornos poblados por humanos, donde colaboran y se comunican con las personas de forma natural, son todavía solo un sueño lejano. Actualmente, los robots humanoides se encuentran en una etapa en la que pueden ejecutar una variedad de tareas. Las tareas que se utilizan, por ejemplo, en competiciones de robots humanoides, por ejemplo, DARPA Robotics Challenge, incluyen:

1. Conducir: conducir un vehículo utilitario por un carril bloqueado con barreras.
2. Salida: salga del vehículo y muévase a un área específica.
3. Puerta: abre una puerta y viaja a través de una entrada.
4. Válvula: girar una válvula accionada por un volante.

5. Pared: utilice una herramienta (taladro o sierra) para cortar un panel de hormigón.
6. Tarea sorpresa, que no se supo hasta el día de la competencia: sacar un enchufe magnético de un enchufe, insértelo en otro enchufe.
7. Escombros: cruza un campo de escombros o supera terrenos irregulares.
8. Escaleras: sube las escaleras.

Los robots humanoides modernos ya pueden ejecutar tales tareas de forma autónoma, siempre que se conozca de antemano el estado aproximado del entorno. Sin embargo, todavía es difícil para los robots humanoides modernos realizar tales tareas sin alguna información previa sobre las condiciones ambientales que un programador puede aprovechar para preparar el robot humanoide para la ejecución de múltiples tareas. La integración y la secuenciación continua de múltiples acciones de robots sigue siendo un problema y todavía se necesita cierto grado de teleoperación cuando se realizan secuencias de tareas más largas.

Si bien la mayoría de las metodologías robóticas estándar con respecto a la cinemática, la dinámica, el control, la planificación de la trayectoria y la detección de robots también son relevantes cuando se desarrollan robots humanoides, la robótica humanoide debe abordar varios problemas específicos.

El principal es el problema de la locomoción y el equilibrio bípedos. A diferencia de otros robots, los robots humanoides deben caminar y mantener el equilibrio durante su funcionamiento. En el desafío de robótica mencionado anteriormente, la locomoción resultó ser uno de los mayores problemas.

El indicador básico que describe el equilibrio de un robot humanoide es el concepto de punto de momento cero, generalmente abreviado como ZMP. El concepto de ZMP fue introducido por Miomir Vukobratović en 1968. Sigue siendo el enfoque más utilizado para generar movimientos de marcha dinámicamente estables en los que el pie o los pies de apoyo mantienen contacto con la superficie del suelo en todo momento. Esto es importante para evitar que el robot se caiga. Los conceptos básicos relacionados con ZMP se describen en la Secc. [14.1](#).

Otro problema específico que surge cuando se programan robots humanoides es la gran cantidad de grados de libertad que requieren en comparación con los robots industriales estándar. Mientras que los robots industriales típicos solo tienen 6 y rara vez 7 grados de libertad, los robots humanoides a menudo tienen más de 30 grados de libertad. Por ejemplo, uno de los robots humanoides más conocidos Honda Asimo tiene 34 grados de libertad: 3 en la cabeza, 7 en cada brazo (3 en el hombro, 1 en el codo y 3 en la muñeca), 1 en la cintura, 6 en cada pierna y 2 en cada mano. Una cantidad tan grande de grados de libertad hace que la programación clásica de robots con colgantes de enseñanza y lenguajes de programación textuales no sea práctica. En cambio, podemos explotar la similitud entre los robots humanoides y los humanos. Debido a esta similitud, los robots humanoides pueden realizar tareas de manera similar a como lo hacen los humanos. Este hecho da lugar a la idea de que en lugar de programar un robot humanoide, un maestro humano puede mostrarle al robot cómo ejecutar la tarea deseada. El robot puede entonces intentar replicar la ejecución humana. Esta forma de programación de robots se denomina programación por demostración o aprendizaje por imitación. Su aplicación exitosa requiere que un robot transfiera el movimiento demostrado a su propia estructura cinemática y dinámica. Además, dado que los entornos naturales rara vez son estáticos sino que cambian a menudo, el robot no puede simplemente replicar los movimientos observados.

En cambio, los movimientos observados deben adaptarse a las condiciones ambientales actuales. Estos temas se tratan en la Secc. [14.2](#).

14.1 Locomoción bípeda

La locomoción bípeda es un tema importante en la robótica humanoide. Aquí nos enfocamos en caminar, que se distingue de otras formas de locomoción bípeda como correr por la restricción de que al menos un pie debe estar siempre en contacto con el suelo.

Como se explica en la introducción, la mayoría de los robots humanoides modernos explotan el principio del punto de momento cero para generar patrones de marcha estables.

14.1.1 Punto de momento cero

A lo largo de esta sección, asumimos que el piso es plano y ortogonal a la gravedad. Comenzamos analizando la distribución de una componente vertical de las fuerzas de reacción del suelo (es decir, la componente ortogonal al suelo, como se muestra en la Fig. 14.1). El punto de momento cero se define como el punto donde el resultante de estas fuerzas se cruza con el suelo. Primero nos enfocamos en el movimiento en el plano sagital (es decir, el plano que divide el cuerpo en la parte izquierda y derecha). Como se muestra en la Fig. 14.1, una componente de la fuerza de reacción del suelo ortogonal al suelo debe ser positiva en todos los puntos de contacto, de lo contrario el pie perdería el contacto con el suelo al no estar unido rígidamente a él. El punto de momento cero p_x de acuerdo con la definición anterior se puede calcular de la siguiente manera

$$p_{x\text{eles}} = \frac{\int_{x_b}^{x_f} x f_z(x) dx}{f_n}, \quad (14.1)$$

$$f_n = \int_{x_b}^{x_f} f_z(x) dx, \quad (14.2)$$

donde $f_z(x)$ es la componente vertical de la fuerza de reacción del suelo en el punto de contacto x y f_n es la fuerza de reacción vertical neta del suelo. La razón por la que p_x se llama punto de momento cero queda clara si se calcula el momento en p_x :

$$\begin{aligned} \tau(p_x) &= - \frac{\int_{x_b}^x f(x - p_x) f_z(x) dx}{f_n} = - \frac{\int_{x_b}^x f x f_z(x) dx}{f_n} - p_{x\text{el}} \frac{\int_{x_b}^x f f_z(x) dx}{f_n} \\ &= -(p_{x\text{el}} - p_{x\text{el}}) = 0. \end{aligned} \quad (14.3)$$

Aquí integramos el momento $\tau = -(x - p_x) f_z$ en toda el área de la suela, es decir $\leq x \leq x_f$. El Por tanto, el momento neto en el punto de momento cero p_x es igual a cero. el x_b punto de momento cero generalmente se abrevia como ZMP. Es el punto de la superficie del suelo donde el momento angular neto es igual a cero. Si existe, ZMP está restringido a estar dentro del polígono de soporte.

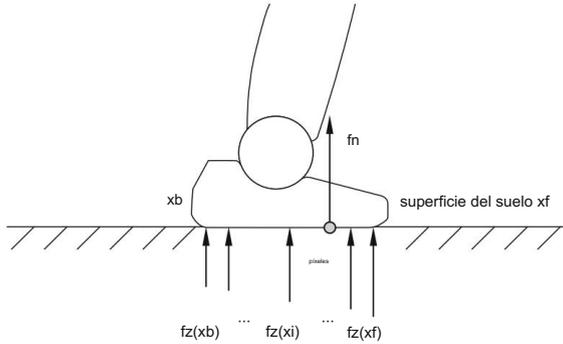


Fig. 14.1 Fuerzas de reacción del suelo $fz(xi)$ en diferentes puntos de contacto xi . El punto de momento cero px y la fuerza de reacción neta del suelo ortogonal a la superficie de apoyo fn se calculan de acuerdo con las Ecs. (14.1) y (14.2), respectivamente

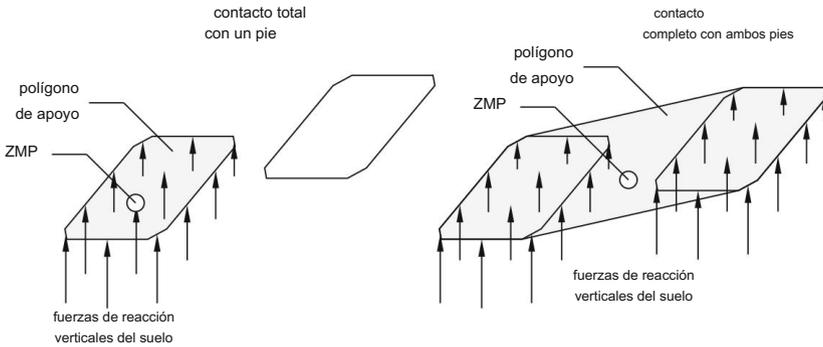


Fig. 14.2 El polígono de apoyo (el área delimitada por una línea gris) se define como el casco convexo de todos los puntos en contacto con el suelo. Izquierda: el polígono de apoyo corresponde a la zona de la suela cuando solo un pie está en pleno contacto con el suelo. Derecha: el polígono de apoyo corresponde al casco convexo de las esquinas de ambos pies cuando ambos pies están en pleno contacto con el suelo

Para el robot humanoide general que camina en 3-D, también se debe considerar el movimiento lateral. Como se muestra en la figura 14.2, debemos distinguir entre dos casos: solo un pie está en pleno contacto con el suelo o ambos pies están en pleno contacto con el suelo. Se supone que el suelo es plano a la altura pz . La derivación de ZMP se basa en la relación entre el momento respecto al punto $p = (px, py, pz)$ de la fuerza de reacción vertical del suelo $[0, 0, fz(\xi)]$ en todos los puntos $\xi = (\xi_x, \xi_y, pz)$ en la superficie de contacto. El momento está dado por

$$\tau(pag) = (\xi - pag) \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ fz(\xi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\xi_y - py) fz(\xi) \\ -(\xi_x - px) fz(\xi) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14.4)$$

Para obtener el momento con respecto al punto $p = (p_x, p_y, p_z)$ debido a las fuerzas de reacción ortogonales del suelo $[\vec{0}, 0, f_z(\xi)]$ que surgen en todos los puntos de contacto ξ entre la suela y el suelo, necesitamos integrar en todos los puntos de contacto

$$n(p) = \begin{pmatrix} \xi_x - p_x \\ \xi_y - p_y \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_z(\xi) \end{pmatrix} dS = \begin{pmatrix} - \int_S (\xi_y - p_y) f_z(\xi) dS \\ \int_S (\xi_x - p_x) f_z(\xi) dS \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (14.5)$$

donde S denota el área de contacto. De manera similar al caso 2D, el punto en el suelo donde el momento de la normal de la fuerza de reacción del suelo se vuelve cero (es decir, el punto de momento cero $\tau n(p) = 0$), viene dado por

$$p = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int_S \xi_x f_z(\xi) dS \\ \int_S \xi_y f_z(\xi) dS \\ \int_S f_z(\xi) dS \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \tau \end{matrix}, \quad (14.6)$$

dónde

$$f_n = \int_S f_z(\xi) dS \quad (14.7)$$

es la suma de las fuerzas de reacción del suelo ortogonales al suelo en todos los contactos entre la suela y el suelo.

En un robot humanoide real, se garantiza que ZMP (si existe) se encuentra dentro del polígono de soporte porque si existe contacto entre la suela y la superficie del suelo, la componente de la fuerza de reacción del suelo ortogonal al suelo debe ser positiva. De lo contrario, se perdería el contacto entre la suela y la superficie del suelo, ya que el robot no está fijado al suelo y, por lo tanto, no puede generar fuerzas de reacción verticales negativas. El robot humanoide puede controlar su postura con los pies solo si el ZMP existe dentro del polígono de apoyo. De lo contrario, el robot pierde el contacto con el suelo y ya no puede controlar la postura con los pies.

14.1.2 Generación de patrones de marcha

En la marcha bípeda, los pies del robot alternan entre dos fases:

- fase de apoyo en la que la ubicación del pie no debe cambiar,
- fase de balanceo en la que el pie se mueve.

La Figura 14.3 muestra estas dos fases distintas en el ciclo de la marcha: cuando ambos pies están en contacto con el suelo, el robot está en fase de doble apoyo. Los pies no se mueven en esta fase. Una vez que uno de los pies comienza a moverse, el robot pasa de la fase de apoyo doble a la única, en la que uno de los dos pies se mueve. A la fase de apoyo simple le sigue otra fase de apoyo doble una vez que el pie en la fase de balanceo establece contacto con el suelo.

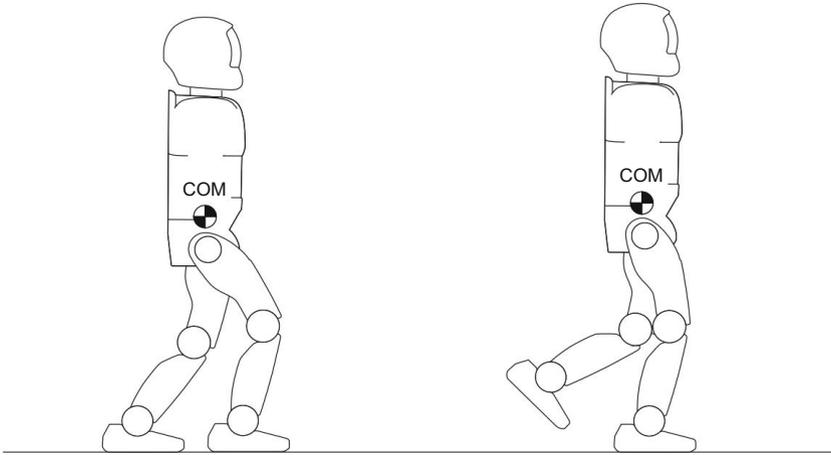


Fig. 14.3 Fase de apoyo simple y doble. En la fase de doble apoyo, ambos pies están en contacto con el suelo y el peso del robot está soportado por ambas piernas. En la fase de apoyo único, un pie está en movimiento, mientras que el otro pie que sostiene al robot está en contacto con el suelo

En la marcha basada en ZMP, uno o ambos pies del robot están siempre en contacto con el suelo. Por lo tanto, ZMP existe y el robot puede mantener el equilibrio asegurándose de que el polígono de soporte contenga el ZMP. Sin embargo, el robot no puede controlar directamente el ZMP como se define en las ecuaciones. (14.1) y (14.6). Por lo tanto, introducimos el concepto de centro de masa (COM). ZMP se puede controlar explotando su relación con COM.

El centro de masa (COM) se define como la posición promedio de todas las partes del cuerpo de un robot humanoide, ponderado con la masa de las partes del cuerpo. Para un robot con enlaces rígidos D , COM se puede calcular como:

$$\mathbf{c} = \frac{\sum_{i=1}^D m_i \mathbf{p}_i}{\sum_{i=1}^D m_i}, \quad \text{METRO} = \text{mi}, \quad (14.8)$$

donde m_i es la masa del eslabón i -ésimo y \mathbf{p}_i su posición, que se puede calcular mediante cinemática directa siempre que se conozca el centro de masa de cada eslabón en las coordenadas locales del eslabón. Con algunas aproximaciones, la relación entre ZMP y COM se puede especificar de la siguiente manera

$$p_x = c_x - \frac{(c_z - p_z)c''_x}{c''_z + g}, \quad (14.9)$$

$$p_y = c_y - c''_z \frac{(c_z - p_z)c''_y}{+g}, \quad (14.10)$$

donde p_z denota la altura de la planta baja, g es la constante de gravedad y $c = (c_x, c_y, c_z)$ y $p = (p_x, p_y, p_z)$ son las coordenadas de COM y ZMP, respectivamente.

Tenga en cuenta que si el robot está en reposo, es decir, $\dot{c}_x = \dot{c}_y = 0$, entonces ZMP y la proyección de COM coinciden como $p_x = c_x$ y $p_y = c_y$. Nótese también que si el suelo es plano y ortogonal a la gravedad, como supusimos en la Secc. 14.1.1, p_z es una constante.

En general distinguimos entre caminar estático y dinámico. La marcha estática se define como cualquier movimiento de marcha estable en el que la proyección de COM siempre permanece dentro del polígono de apoyo. Esto significa que si el robot deja de moverse por completo en cualquier momento durante la marcha, no se cae porque para el robot en reposo, la proyección de COM sobre la superficie del suelo es igual a la ZMP (véanse las ecuaciones (14.9) y (14.10)). En la marcha estática, el movimiento debe ser generalmente lento para que la proyección de COM esté cerca del ZMP. Este tipo de caminar normalmente requiere pies grandes y fuertes articulaciones de los tobillos para generar suficiente fuerza en los tobillos. A medida que el movimiento del robot se vuelve más rápido, ZMP y la proyección de COM se vuelven más diferentes y la estabilidad no se puede garantizar controlando solo la proyección de COM.

Se generan comportamientos de marcha más efectivos mediante patrones de marcha dinámicos, en los que la proyección de COM no es igual a ZMP y puede quedar fuera del polígono de apoyo durante algún período de movimiento. En la figura 14.4 se muestra un patrón de caminata dinámico basado en ZMP. Dichos patrones están planificados para que la ZMP permanezca dentro de los límites del polígono de apoyo en todas las fases de la marcha. Esto se puede lograr de la siguiente manera:

- Especificar el movimiento cartesiano de los pies del robot. Aquí se prescribe la longitud del paso del robot y la sincronización del movimiento del pie. •

Especifique la trayectoria ZMP de referencia para que ZMP permanezca dentro del soporte polígono en todo momento.

- Determinar el movimiento de la parte superior del cuerpo del robot humanoide para realizar el movimiento ZMP de referencia. Esto se puede lograr usando las Ecs. (14.9) y (14.10). • El movimiento de las piernas del robot humanoide finalmente se calcula a partir del cuerpo y los pies. movimiento mediante cinemática inversa.

El movimiento de COM no está completamente especificado por las ecuaciones (14.9) y (14.10) ya que solo hay dos ecuaciones y tres parámetros desconocidos. Para especificar completamente el movimiento de COM y, en consecuencia, el movimiento de la parte superior del cuerpo del robot humanoide, se debe imponer una restricción adicional. Hay varios enfoques posibles. El más simple de ellos es establecer la altura de COM en un valor constante (es decir, $c_z = \text{const}$, $\dot{c}_z = 0$).

Con esta suposición, el movimiento de COM está completamente especificado por las Ecs. (14.9) y (14.10). Se puede lograr un movimiento más adaptable y activo si se permite que c_z varíe.

Tenga en cuenta que el enfoque anterior determina el movimiento de COM sin considerar las piernas. Sin embargo, dado que la mayor parte de la masa generalmente se concentra en la parte superior del cuerpo de un robot humanoide y dado que no es necesario seguir exactamente la trayectoria ZMP prescrita, el enfoque anterior es suficiente para generar patrones de caminata dinámicamente estables.

Si se dispone de un modelo preciso del robot, la marcha bípeda se puede realizar simplemente siguiendo un patrón de marcha predeterminado. Debido al ruido y a las inexactitudes del modelo, en la práctica, este enfoque generalmente no da como resultado un comportamiento de marcha estable.

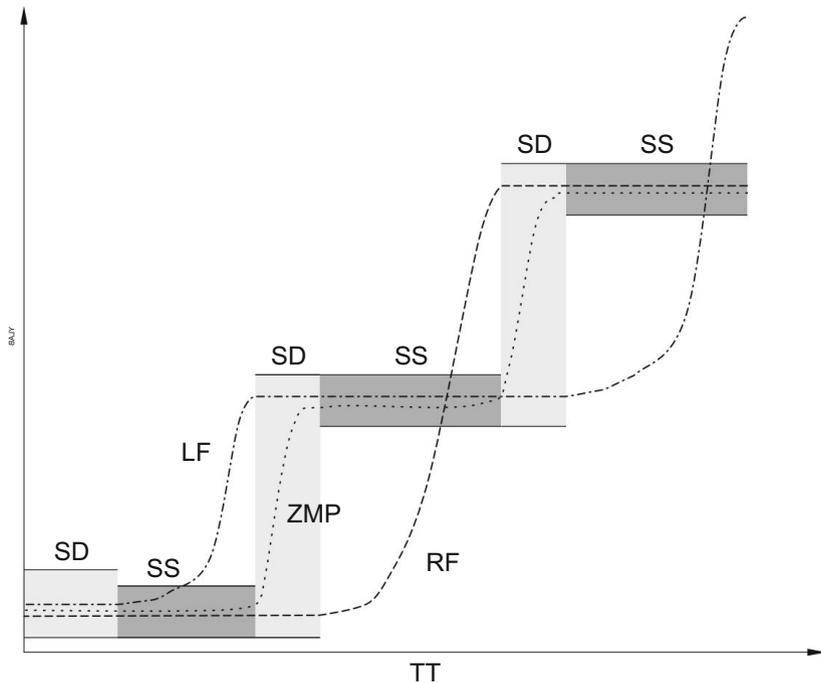


Fig. 14.4 Ejemplo de patrón de marcha basado en ZMP en el plano sagital. El robot comienza con ambos pies colocados aproximadamente paralelos al suelo y luego genera tres pasos, comenzando con el pie izquierdo. Las áreas sombreadas muestran la extensión del polígono de soporte durante la fase de soporte simple (área sombreada oscura) y la fase de soporte doble (área sombreada clara). La trayectoria ZMP (punteada) está planificada de tal manera que permanece dentro del polígono de apoyo durante toda la duración de la marcha. También se muestran las trayectorias de ambos pies (izquierda: discontinua, derecha: discontinua)

sin complementar el patrón de caminata precalculado con un estabilizador que modifica el patrón de acuerdo con la entrada sensorial proporcionada por giroscopios, acelerómetros, sensores de fuerza, cámaras, etc.

Cabe señalar que ZMP no es el único principio que se puede utilizar para generar patrones de marcha estables. Es posible generar un patrón de caminata en el que un robot es inestable durante algún período de movimiento. Dichos patrones de caminata deben planificarse para que el robot pueda recuperarse de las inestabilidades antes de caer al suelo.

14.2 Aprendizaje por imitación

Para aprovechar al máximo su potencial, los robots humanoides deberían poder realizar una variedad de tareas en entornos no estructurados (por ejemplo, hogares, hospitales, tiendas, oficinas e incluso entornos al aire libre). El mencionado desafío de robótica estaba orientado

hacia robots humanoides en sitios de desastre. A diferencia de muchos entornos industriales, donde los robots se utilizan ampliamente en la actualidad, estos entornos no se pueden preparar de antemano para facilitar el funcionamiento de un robot humanoide. La programación de robots humanoides se complica aún más por la gran cantidad de grados de libertad involucrados en el movimiento del robot humanoide. Por lo tanto, las técnicas clásicas de programación de robots basadas en colgantes de enseñanza, sistemas de simulación fuera de línea cuidadosamente preparados y lenguajes de programación no son suficientes para los humanoides. En cambio, es necesario dotar a los robots humanoides de capacidades de aprendizaje y adaptación. De esta forma pueden programarse más fácilmente e incluso adquirir conocimientos adicionales de forma autónoma.

El aprendizaje de los comportamientos de los robots humanoides es un problema difícil porque el espacio de todos los movimientos de los robots humanoides que debe explorarse es muy grande y aumenta exponencialmente con el número de grados de libertad. Una solución a este problema es centrar el aprendizaje en aquellas partes del espacio de movimiento del robot que son realmente relevantes para la tarea deseada. Esto se puede lograr mediante el aprendizaje por imitación, también conocido como programación por demostración. Con este enfoque, un maestro humano le demuestra a un robot cómo realizar la tarea deseada. Para que funcione, un robot debe poder extraer la información importante de la demostración humana y replicar las partes esenciales de la ejecución de la tarea. Si bien en la mayoría de los casos no es necesario replicar exactamente los movimientos demostrados para ejecutar con éxito la tarea deseada, es ventajoso si el robot puede imitar el movimiento demostrado tanto como sea posible. Dado que el cuerpo de un robot humanoide es similar al cuerpo humano, el aprendizaje por imitación suele ser un buen enfoque para centrar el aprendizaje en las partes relevantes del espacio de movimiento del robot humanoide.

14.2.1 Observación del movimiento humano y su transferencia al movimiento del robot humanoide

Existen muchos sistemas y tecnologías de medición posibles que se pueden utilizar para observar y medir los movimientos humanos. Incluyen

- sistemas ópticos de captura de movimiento,
- conjuntos de unidades de medida inercial (IMU),
- métodos de visión artificial para la estimación del movimiento humano,
- exoesqueletos pasivos,
- guía manual.

A continuación explicamos las principales ventajas y desventajas de estos sistemas.

14.2.1.1 Dispositivos de seguimiento óptico para captura de movimiento humano

Los rastreadores ópticos se basan en un conjunto de marcadores adheridos al cuerpo humano. Los marcadores pueden ser pasivos o activos. Los marcadores pasivos están hechos de materiales retrorreflectantes, que reflejan la luz en la dirección de donde proviene. En sistemas con pasivo

marcadores, las cámaras están equipadas con una banda de diodos emisores de luz infrarroja (LED). La luz emitida rebota en el marcador en la dirección de la cámara, lo que hace que el marcador sea mucho más brillante que cualquier otro punto de la imagen. Esta propiedad hace que los marcadores retrorreflectantes sean fáciles de detectar en las imágenes de la cámara. Mediante la triangulación, se puede calcular la ubicación de un marcador 3D si el marcador se detecta en al menos dos imágenes de cámara adquiridas simultáneamente. El movimiento predicho de los marcadores visibles se utiliza para hacer coincidir los marcadores visibles extraídos en dos tiempos de medición sucesivos.

A diferencia de los marcadores pasivos que reflejan la luz, los marcadores activos están equipados con LED y, por lo tanto, emiten su propia luz. En consecuencia, deben estar alimentados. Los rastreadores ópticos con marcadores activos generalmente iluminan solo un marcador a la vez durante un tiempo muy corto. Por lo tanto, el sistema siempre sabe qué marcador está visible actualmente, proporcionando así la identidad del marcador. Por esta razón, los sistemas de seguimiento óptico con marcadores activos pueden hacer frente a las oclusiones temporales con mayor eficacia que los sistemas con marcadores pasivos porque un marcador activo ocluido se puede identificar una vez que vuelve a ser visible. Este no es el caso de los marcadores pasivos. Por otro lado, dado que los marcadores activos requieren energía, deben conectarse a una fuente de alimentación con cables. Esto los hace más engorrosos de usar que los marcadores pasivos que no requieren cables.

Para medir el movimiento humano, se deben colocar marcadores pasivos y activos en los segmentos del cuerpo humano en las ubicaciones adecuadas. Por lo general, se adjuntan al menos tres marcadores a cada segmento del cuerpo; de lo contrario, no se puede estimar la ubicación de los segmentos del cuerpo rígido. En el pasado se diseñaron varios trajes especiales de captura de movimiento para facilitar la colocación de marcadores en los segmentos corporales relevantes.

Los sistemas de seguimiento óptico con marcadores activos o pasivos proporcionan ubicaciones tridimensionales de marcadores adheridos al cuerpo humano que están actualmente a la vista. La posición y la orientación tridimensionales de un segmento del cuerpo se pueden estimar si al menos tres marcadores adheridos al segmento son visibles. Para reproducir el movimiento observado con un robot, esta información debe estar relacionada con el movimiento del robot. Con cierto grado de precisión, el movimiento humano se puede modelar como un movimiento articulado de partes rígidas del cuerpo. Si la cinemática de un robot humanoide está lo suficientemente cerca de la cinemática del cuerpo humano, podemos incrustarlo en un cuerpo humano como se muestra en la figura 14.5. Dicha incrustación se puede usar más tarde para estimar los ángulos de las articulaciones a partir de las orientaciones de los sucesivos segmentos del cuerpo. Supongamos que la orientación de dos segmentos corporales sucesivos viene dada por las matrices de orientación R_1 y R_2 y que la articulación que une los dos segmentos consta de tres ejes de articulación sucesivos j_1 , j_2 y j_3 con ángulos de rotación indicados por θ , ψ y ϕ , respectivamente. Suponemos además que dos ejes de articulación consecutivos son ortogonales y que los tres ejes se intersectan en un punto común. En tal disposición, los tres ángulos articulares corresponden a los ángulos de Euler presentados en el Cap. 4. Hay en total 12 combinaciones diferentes de ejes de articulación que cubren todas las disposiciones posibles de ejes en articulaciones con tres grados de libertad. En la figura 14.5, las articulaciones del torso, el cuello, los hombros, las muñecas y los tobillos pueden describirse mediante una combinación apropiada de ángulos de Euler. La relación entre estos valores viene dada por

$$R_1 = R(j_1, \theta)R(j_2, \psi)R(j_3, \phi)R_2 = R(j_1, \theta, \psi, \phi)R_2. \quad (14.11)$$

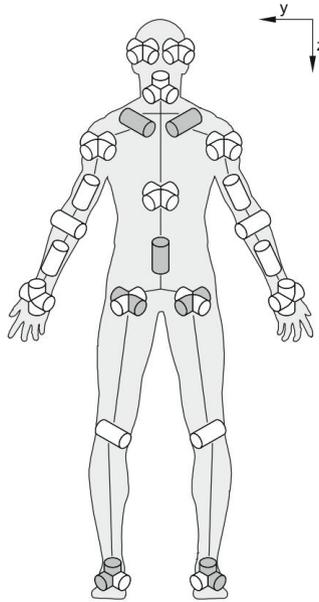


Fig. 14.5 Estructura cinemática de un robot humanoide. En posición erguida con brazos y piernas extendidos, todos los ejes de las articulaciones son paralelos a uno de los tres ejes principales del cuerpo (adelante/atrás: eje x, izquierda/derecha: eje y, arriba/abajo: eje z)

Los ángulos conjuntos ϕ , θ y ψ se pueden calcular resolviendo la ecuación

$$R(\phi, \theta, \psi) = R_1 R_2 \dots R_n \quad (14.12)$$

Esta ecuación depende de la elección de los ejes de articulación j_1 , j_2 y j_3 . El movimiento observado puede ser replicado por un robot una vez que se hayan estimado todos los ángulos de unión relevantes del modelo integrado.

Los sistemas de seguimiento óptico también pueden estimar con precisión la posición y orientación absolutas del cuerpo humano en un sistema de coordenadas mundial. Dado que normalmente se supone que la raíz de la cinemática de un robot humanoide está en el marco de coordenadas local adjunto al torso, la posición y orientación estimadas del torso corresponden a la posición y orientación absolutas del cuerpo humano en coordenadas mundiales.

14.2.1.2 Unidades de medida inercial (IMU)

Las unidades de medición inercial (IMU) contienen diferentes sensores, incluidos acelerómetros para medir la aceleración lineal en 3D y giroscopios para medir la tasa de cambio de la orientación en 3D (es decir, la velocidad angular). Las IMU también incluyen a menudo magnetómetros para proporcionar mediciones redundantes para mejorar la precisión y reducir la

deriva. A partir de estos datos, se puede estimar la posición y orientación de una IMU como se explica en la Secc. 7.2.6.

En el contexto de transferir el movimiento humano al movimiento de un robot humanoide, los datos de la IMU se pueden usar para estimar la posición y la orientación de cada segmento del cuerpo que tiene una IMU adjunta. Al igual que con los rastreadores basados en marcadores, los ángulos de las articulaciones se pueden estimar a partir de las orientaciones de segmentos corporales sucesivos utilizando la ecuación. (14.12).

A diferencia de los sistemas de seguimiento óptico, las IMU no sufren oclusiones ya que no se necesitan cámaras externas para medir el movimiento de la IMU. Por otro lado, las IMU no son tan precisas como los sistemas de seguimiento óptico, ya que implican la integración de la aceleración lineal y la velocidad angular. La integración también puede causar deriva, especialmente al estimar la posición y orientación absolutas del cuerpo en el espacio. La deriva se puede reducir mediante el desarrollo de filtros apropiados que aprovechen la redundancia existente en las mediciones obtenidas de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros.

14.2.1.3 Exoesqueletos pasivos y guía manual

Una cuestión crucial con la que deben lidiar todos los sistemas anteriores es que miden el movimiento humano sin tener en cuenta las diferencias entre la cinemática y la dinámica humana y robótica. Estas medidas a menudo deben adaptarse a las limitaciones del robot, de lo contrario, el robot no puede ejecutar los movimientos demostrados. Alternativamente, se puede formular un problema de optimización no lineal para adaptar el movimiento demostrado a las capacidades de un robot objetivo.

El problema de transferir el movimiento humano al movimiento de un robot se puede evitar aplicando diferentes sistemas de medición. Una posibilidad es diseñar un dispositivo pasivo especial, que se lleve como un exoesqueleto con los grados de libertad que corresponden a los grados de libertad del robot. El exoesqueleto pasivo debe diseñarse de tal manera que no restrinja el movimiento para la mayoría de los movimientos. No tiene motores, pero debe estar equipado con goniómetros para medir los ángulos de las articulaciones. Los ángulos de articulación medidos por el exoesqueleto se pueden usar para controlar directamente el robot si la cinemática del robot objetivo corresponde a la cinemática del exoesqueleto. Un inconveniente de los exoesqueletos pasivos es que, al igual que la ropa, deben construirse del tamaño específico de un demostrador humano.

Como se explica en la Secc. 12.3.2, algunos robots pueden ser guiados físicamente a través de los movimientos deseados (ver también Fig. 14.6). Durante el guiado manual, el movimiento es registrado por los propios sensores de ángulo articular del robot y, por lo tanto, es cinemáticamente factible por defecto. Este enfoque es efectivo si el robot es compatible y puede compensar la gravedad, de modo que un demostrador humano pueda moverlo fácilmente en la dirección deseada.

El principal inconveniente del guiado manual es que la demostración del movimiento deseado es menos natural para un demostrador humano que, por ejemplo, cuando se utilizan sistemas de seguimiento basados en marcadores. Por lo tanto, con tales sistemas, a veces no es tan fácil demostrar movimientos complejos. Por ejemplo, la guía manual no es efectiva para demostrar movimientos de baile complejos. Por otro lado, un humano puede demostrar fácilmente el baile directamente y medirlo con un rastreador óptico, IMU o un exoesqueleto pasivo.

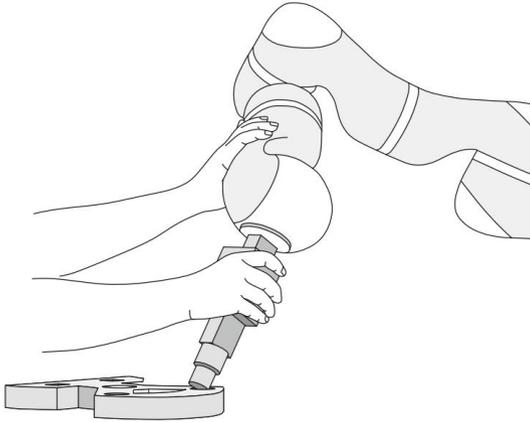


Fig. 14.6 Demostración de la tarea de clavar en el agujero mediante la enseñanza cinestésica. El demostrador humano guía el brazo antropomórfico a través de la ejecución de la tarea con sus propias manos

14.2.2 Primitivas de Movimiento Dinámico

Insecto. 14.2.1 discutimos cómo medir las demostraciones humanas y cómo transformar los movimientos medidos en las trayectorias de los ángulos de las articulaciones del robot. En algunos casos, también es necesario adaptar el movimiento medido a las capacidades cinemáticas y dinámicas del robot objetivo. Por lo general, terminamos con una secuencia de medición

$$\{y^d(t_j), t_j\}_{j=1}^T, \quad (14.13)$$

donde $y^d(t_j)$ y t_j son los ángulos de articulación medidos en el momento t_j , D es el número de grados de libertad y T es el número de mediciones. Esta secuencia define la trayectoria de referencia. Sin embargo, para un control efectivo, necesitamos generar comandos de motor con la velocidad de servo del robot objetivo. La tasa de servo del robot suele ser más alta que la tasa de captura del sistema de medición. Por lo tanto, a partir de los datos de medición (14.13), necesitamos generar una trayectoria de referencia continua para generar comandos de motor para controlar el robot a la velocidad adecuada.

En esta sección, presentamos las primitivas de movimiento dinámico (DMP), que proporcionan un marco integral para el aprendizaje por imitación y el control efectivos de los movimientos de los robots. Los DMP se basan en un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales con dinámicas de atracción bien definidas. Para un solo grado de libertad del robot, aquí indicado por y y tomado como uno de los ángulos de articulación registrados D , se analiza el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes para derivar un DMP

$$\tau z' = \alpha z(\beta z(g - y) - z), \quad \tau y' = \dots \quad (14.14)$$

$$z. \quad (14.15)$$

Tenga en cuenta que la variable auxiliar z es solo una velocidad escalada de la variable de control y . Las constantes αz y βz tienen una interpretación en términos de rigidez y amortiguamiento del resorte. Para las constantes apropiadamente seleccionadas $\alpha z, \beta z, \tau > 0$, estas ecuaciones forman un sistema dinámico lineal globalmente estable con g como un único punto atractor. A menudo nos referimos a g como el objetivo del movimiento. Esto significa que para cualquier configuración inicial $y(0) = y_0$, la variable y alcanza la configuración meta g después de un cierto tiempo, al igual que un resorte estirado, al soltarse, regresará a su posición de reposo. τ se conoce como la constante de tiempo. Afecta la velocidad de convergencia al punto atractor g .

14.2.3 Propiedades de convergencia de sistemas dinámicos lineales

Analicemos por qué el sistema anterior es útil. Empezamos escribiendo una solución general del sistema de ecuaciones diferenciales lineales no homogéneo (14.14) y (14.15). Es bien sabido que la solución general de tal sistema puede escribirse como la suma de la solución particular y homogénea

$$\begin{aligned} z(t) &= z_p(t) + z_h(t) \\ y(t) &= y_p(t) + y_h(t) \end{aligned} \quad (14.16)$$

Aquí $[z_p(t), y_p(t)]^T$ denota cualquier función que resuelve el sistema lineal (14.14)–(14.15), mientras que $[z_h(t), y_h(t)]^T$ solución general de la parte homogénea de las Ecs. (14.14)–(14.15), es decir,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{y} \end{bmatrix} &= \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} -\alpha z \\ \beta z - y \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} -\alpha & 0 \\ \beta & -1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Es fácil comprobar que la función constante $[z_p(t), y_p(t)]^T$ resuelve el sistema de ecuaciones (14.14) y (14.15). Además, es bien sabido que la solución general de

El sistema homogéneo (14.17) viene dado por $[z_h(t), y_h(t)]^T = \exp(\mathbf{A}t) \mathbf{c}$, donde $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^2$ es una constante arbitraria. Así, la solución general de las Ecs. (14.14) y (14.15) se pueden escribir como

$$\begin{aligned} z(t) &= 0 \\ y(t) &= \dots + \exp(\mathbf{A}t) \mathbf{c} \end{aligned} \quad (14.17)$$

La constante \mathbf{c} debe calcularse a partir de las condiciones iniciales, $[z(0), y(0)]^T = [z_0, y_0]^T$. Los valores propios de \mathbf{A} están dados por $\lambda_{1,2} = -\alpha z \pm \alpha \sqrt{4\alpha z \beta z / (2\tau)}$. Solución si la parte real de los valores propios $\lambda_{1,2}$ es menor que 0, lo cual es cierto para cualquier $\alpha z, \beta z, \tau > 0$. El sistema está críticamente amortiguado, lo que significa que y converge a g sin oscilar y más rápido que para cualquier otra elección de \mathbf{A} , si \mathbf{A} tiene dos valores propios negativos iguales. Esto sucede en $\alpha z = 4\beta z$ donde $\lambda_{1,2} = -\alpha z / (2\tau)$.

14.2.4 Primitivas de movimiento dinámico para movimientos punto a punto

El sistema de ecuaciones diferenciales (14.14)–(14.15) asegura que x converge a g desde cualquier punto inicial y_0 . Por lo tanto, se puede utilizar para realizar movimientos simples de punto a punto. Para aumentar un conjunto bastante limitado de trayectorias que pueden generarse mediante (14.14) y (14.15) y permitir así la generación de movimientos generales punto a punto, podemos agregar un componente no lineal a la ecuación. (14.14). Esta función no lineal a menudo se denomina término forzado. Una opción estándar es agregar una combinación lineal de funciones de base radial Ψ_i

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} w_i \Psi_i(x)}{\sum_{i=1}^{n_i} \Psi_i(x)} x(g - y_0), \quad (14.18)$$

$$\Psi_i(x) = \exp -h_i (x - c_i)^2, \quad (14.19)$$

donde c_i son los centros de las funciones de base radial distribuidas a lo largo de la fase de la trayectoria e $h_i > 0$. El término $g - y_0$, $y_0 = y(t_1)$, se utiliza para escalar la trayectoria si cambia la configuración inicial y/o final. Siempre que el principio y el final del movimiento se mantengan constantes, este factor de escala no tiene efecto y se puede omitir. La variable de fase x se usa para forzar el término (14.18) en lugar del tiempo para hacer más implícita la dependencia de la política de control resultante en el tiempo. Su dinámica está definida por

$$\tau \dot{x} = -\alpha x, \quad (14.20)$$

con el valor inicial $x(0) = 1$. Una solución a (14.20) viene dada por

$$x(t) = \exp(-\alpha t / \tau). \quad (14.21)$$

La propiedad atractiva de usar la variable de fase x en lugar del tiempo explícito es que al modificar apropiadamente la Ec. (14.20), la evolución del tiempo se puede detener para tener en cuenta las perturbaciones durante el movimiento. No es necesario gestionar el reloj interno del sistema. Obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales no lineales

$$\tau \dot{z} = \alpha z(\beta z(g - y) - z) + f(x), \quad \tau \dot{y} = z. \quad (14.22)$$

$$(14.23)$$

La variable de fase x y consecuentemente $f(x)$ tienden a 0 a medida que aumenta el tiempo. Por lo tanto, la influencia del término no lineal $f(x)$ disminuye con el tiempo. En consecuencia, a través de la integración del sistema (14.22)–(14.23) las variables del sistema T están garantizados, $[z, y]$ convergen a $[0, ^T]$ al igual que el sistema lineal (14.14)–(14.15). la política de control $g]$ especificadas por la variable y y sus derivadas de primer y segundo orden definen lo que llamamos un movimiento dinámico primitivo (DMP). Para un sistema con muchos grados de

libertad, cada grado de libertad está representado por su propio sistema de ecuaciones diferenciales (14.22)–(14.23), mientras que la fase x es común a todos los grados de libertad. Esto se puede hacer porque la fase Eq. (14.20) no incluye las variables y y z .

Por lo general, es suficiente determinar los parámetros c_i y h_i de la ecuación. (14.19) estableciendo un patrón de distribución predefinido y aumentando el número de funciones base N hasta que se pueda lograr la precisión de reconstrucción deseada. Por ejemplo, para un N dado podemos definir

$$c_i = \exp -\alpha x \frac{y_0 - 1}{\text{norte} - 1}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (14.24)$$

$$h_{i+1} = \frac{2}{(c_{i+1} - c_i)^2}, \quad y_0 = 1, \dots, \text{norte} - 1, \quad h_N = h_{N-1}. \quad (14.25)$$

Note que $c_1 = 1 = x(0)$ y $c_N = \exp(-\alpha x) = x(t_T)$.

En las ecuaciones anteriores, αx , αz y βz se establecen en valores constantes. Los valores deben elegirse de tal manera que se asegure la convergencia del sistema dinámico subyacente como se explica en la Secc. 14.2.3. Este es el caso si establecemos $\alpha x = 2$, $\beta z = 3$, $\alpha z = 4\beta z = 12$.

Los DMP se diseñaron para proporcionar una representación que permita la codificación precisa de los movimientos punto a punto deseados y, al mismo tiempo, permita la modulación de diferentes propiedades de la trayectoria codificada. En este contexto, los parámetros de forma w_i se determinan para que el robot pueda seguir con precisión la trayectoria deseada integrando el sistema de ecuaciones (14.20), (14.22) y (14.23). Los demás parámetros se utilizan para la modulación y para tener en cuenta las perturbaciones.

Para un movimiento con dos grados de libertad, la figura 14.7 muestra un gráfico de campos de atracción generados por la primitiva de movimiento dinámico. El campo atractor cambia con la evolución de la fase x . Siempre que el robot siga la trayectoria demostrada, el campo de atracción dirige al robot para que se mueva a lo largo de la trayectoria demostrada. Sin embargo, si el robot es perturbado y se desvía de la trayectoria demostrada, los campos atractores generados a lo largo de la fase x dirigen al robot para que alcance la configuración final deseada (objetivo), aunque a lo largo de una trayectoria modificada.

Se puede reproducir una trayectoria a partir de un DMP completamente especificado integrando las Ecs. (14.22), (14.23) y (14.20) usando el método de integración de Euler:

$$z_{k+1} = z_k + \frac{\Delta t}{T} (\alpha z (\beta z (g - y_k) - z_k) + f(x_k)) \Delta t, \quad (14.26)$$

$$y_{k+1} = y_k + \frac{\Delta t}{T} z_k \Delta t, \quad (14.27)$$

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\Delta t}{T} \alpha x_k \Delta t, \quad (14.28)$$

donde $\Delta t > 0$ es la constante de integración que normalmente se establece en la tasa de servo del robot. Los parámetros iniciales para la integración deben ajustarse al estado actual del robot, que

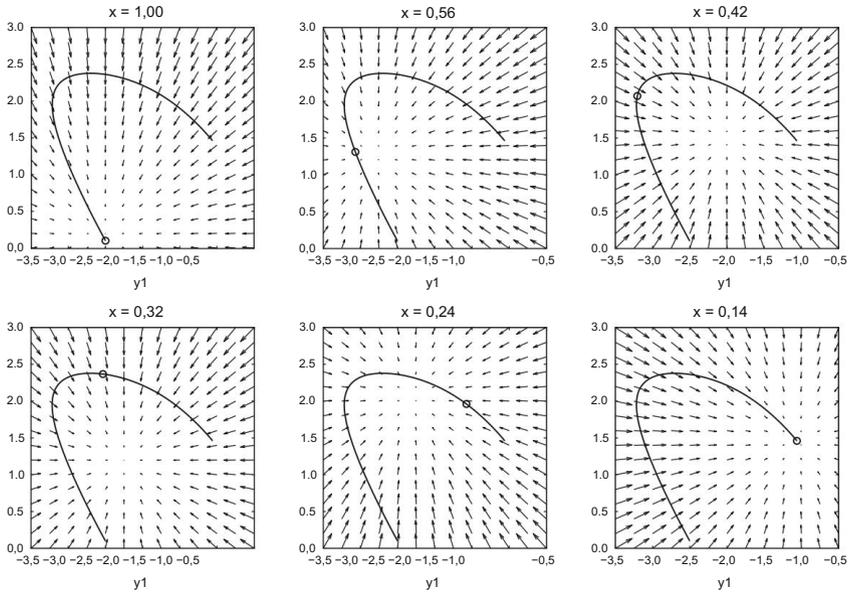


Fig. 14.7 Gráficos de campos de atracción generados por un DMP que especifica el movimiento de un robot con dos grados de libertad y_1 , y_2 ya que se integra a lo largo de la fase x . Las flechas en cada gráfica muestran z_1, z_2 en diferentes valores de y_1 , y_2 en la fase x dada, asumiendo que solo y_1 y y_2 han cambiado en comparación a la trayectoria imperturbable. Los círculos muestran las configuraciones deseadas y_1 , y_2 en la fase dada x

al comienzo del movimiento se supone que está en la posición inicial dada y con velocidad cero. Esto da como resultado las siguientes fórmulas de inicialización: $y_0 = y_0$, $z_0 = 0$, $x = 1$.

14.2.5 Estimación de parámetros DMP de una sola demostración

Para estimar el DMP que representa la secuencia de medición (14.13), primero calculamos las derivadas y' y y'' por diferenciación numérica. Para cualquiera de los grados D de libertad y , obtenemos la siguiente secuencia de medida

$$\{y_d(t_j), y'_d(t_j), y''_d(t_j)\}_{j=1}^T, \quad (14.29)$$

donde $y_d(t_j)$, $y'_d(t_j)$, $y''_d(t_j)$ son las posiciones, velocidades y aceleraciones medidas en la trayectoria de entrenamiento y T es el número de puntos de muestreo. Usando la representación del movimiento DMP, la trayectoria de cualquier movimiento suave puede aproximarse estimando los parámetros w_i de la ecuación. (14.18). Para este propósito nosotros

reescriba el sistema de dos ecuaciones lineales de primer orden. (14.22) y (14.23) como una ecuación de segundo orden. Esto se hace reemplazando z con $\tau y'$ en la ecuación. (14.22). Obtenemos

$$2\tau y'' + \alpha z \tau y' - \alpha z \beta z (g - y) = f(x), \quad (14.30)$$

con f definida como en la ecuación. (14.18). Tenga en cuenta que la constante de tiempo τ debe ser la misma para todos los grados de libertad. Una elección posible es $\tau = t_T - t_1$, donde $t_T - t_1$ es la duración del movimiento de entrenamiento. Por otro lado, el punto atractor g varía según los grados de libertad. Se puede extraer directamente de los datos: $g = y_d(t_T)$. Escribiendo

$$F_d(t_j) = \tau^2 y''_d(t_j) + \alpha z \tau y'_d(t_j) - \alpha z \beta z (g - y_d(t_j)), \quad (14.31)$$

$$f = \begin{matrix} f_d(t_1) \\ \dots \\ f_d(t_T) \end{matrix}, \quad w = \begin{matrix} w_1 \\ \dots \\ w_N \end{matrix}$$

obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones lineales

$$Xw = f, \quad (14.32)$$

que debe resolverse para estimar los pesos de un DMP que codifica el movimiento deseado. La matriz del sistema X está dada por

$$X = (g - y_0) \begin{matrix} \frac{\Psi_1(x_1)}{\sum_{i=1}^n \Psi_i(x_1)} x_1 & \dots & \frac{\Psi_N(x_1) x_1}{\sum_{i=1}^n \Psi_i(x_1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\Psi_1(x_T)}{\sum_{i=1}^n \Psi_i(x_T)} x_T & \dots & \frac{\Psi_N(x_T) x_T}{\sum_{i=1}^n \Psi_i(x_T)} \end{matrix}. \quad (14.33)$$

Los puntos de muestreo de fase x_j se obtienen insertando tiempos de medición t_j en la ecuación. (14.21). Los parámetros w se pueden calcular resolviendo el sistema de ecuaciones lineales anterior en un sentido de mínimos cuadrados. En la figura 14.8 se muestra un ejemplo de estimación de DMP. El DMP calculado asegura que el robot alcance el punto de atracción g en el tiempo t_T . Dado que los DMP han sido diseñados para representar movimientos de punto a punto, el movimiento demostrado debe detenerse por completo al final de la demostración si el robot debe permanecer en el punto de atracción después de un DMP aproxima cualquier otro tipo de movimiento, el robot sobrepasará el punto de atracción y regresará a él después de que la dinámica del sistema lineal de ecuaciones diferenciales de segundo orden comience a dominar el movimiento. Al menos teóricamente, la velocidad no necesita ser cero al comienzo del movimiento, pero es difícil imaginar un sistema real de programación por demostración en el que se adquiera tal trayectoria.

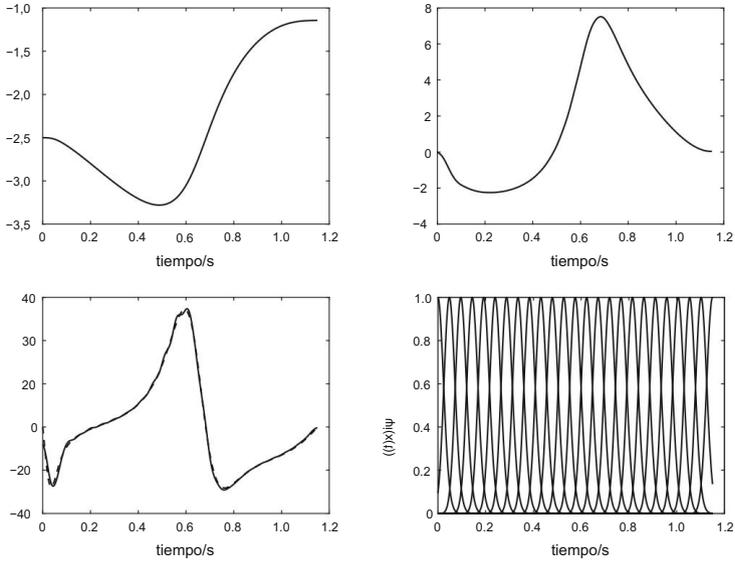


Fig. 14.8 Evolución temporal de un ejemplo de primitiva de movimiento dinámico: variable de control y y sus derivadas, la fase x y las funciones de base radial ψ se muestran con líneas continuas. Las líneas discontinuas muestran los valores demostrados de y , y' y y'' .

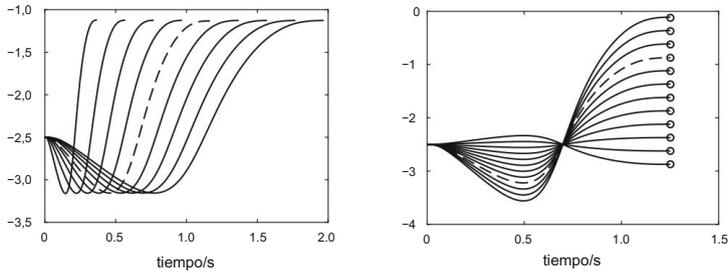


Fig. 14.9 Modulaciones DMP. Las trayectorias punteadas muestran el DMP original sin aplicar ningún modulación. Izquierda: Modulación de tiempo. Las trayectorias sólidas muestran DMP con τ cambiado. Derecha: Gol modulación. Las trayectorias sólidas muestran DMP con un objetivo modificado g . Los círculos muestran la posición de la meta

14.2.6 Modulación de DMP

Una ventaja importante de los DMP es que permiten una fácil modulación de lo aprendido. movimiento. La Figura 14.9 izquierda muestra que cambiando el parámetro τ el movimiento puede acelerarse o ralentizarse. La misma figura también muestra que al cambiar el objetivo parámetro g , la configuración final en la trayectoria se puede cambiar para que el robot se mueva hacia una nueva meta. El término $y_0 - g$ en el término forzado (14.18) asegura que el movimiento se escala adecuadamente a medida que cambia el objetivo o la configuración inicial.

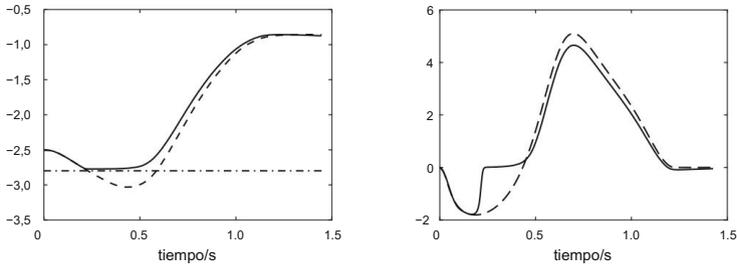


Fig. 14.10 Modulación DMP con evitación del límite conjunto en $y = -2.8$. Las trayectorias sólidas muestran la trayectoria de DMP y su velocidad obtenida al integrar (14.34) en lugar de (14.23), mientras que las trayectorias punteadas muestran el DMP original y su velocidad sin aplicar ninguna modulación.

Las modulaciones más complejas implican cambiar las ecuaciones diferenciales subyacentes. (14.22), (14.23) y/o (14.20). Por ejemplo, la ecuación. (14.23) se puede cambiar a

$$\tau \dot{y} = z - \frac{p}{(y_L - y)^3} \quad (14.34)$$

para implementar la evitación de un límite inferior conjunto. Esto sucede porque una vez que y comienza a aproximarse a y_L , el denominador en la Ec. (14.34) se vuelve pequeño y hay una diferencia significativa entre integrar la Ec. (14.23) o (14.34). La figura 14.10 de la derecha muestra que el segundo término de la ecuación. (14.34) actúa como una fuerza repulsiva, evitando que y se acerque demasiado a y_L . Por otro lado, el denominador en la Ec. (14.34) sigue siendo grande mientras el ángulo de la articulación y esté lejos del límite de la articulación y_L . Por lo tanto, en este caso hay poca diferencia entre integrar la Ec. (14.23) o (14.34) y la trayectoria generada por DMP sigue el movimiento demostrado. Tenga en cuenta que no es necesario aprender nuevos parámetros w_i , objetivo g o constante de tiempo τ debido a la modulación. Pueden permanecer como se aprendieron inicialmente. Sólo la ecuación. (14.23) debe cambiarse a (14.34) para garantizar la evitación del límite conjunto durante el control en línea.

La propiedad atractiva de aplicar la variable fase en lugar del tiempo es que podemos modular fácilmente la evolución temporal de la fase, por ejemplo, acelerando o desacelerando un movimiento según corresponda mediante términos de acoplamiento. En lugar de integrar las Ecs. (14.20) y (14.23) en el momento de la ejecución, las ecuaciones modificadas. (14.20) y (14.36) podrían integrarse

$$\tau \dot{x} = - \frac{\alpha x}{1 + \alpha p x (y - \tilde{y}) \tau y^{-2}}, \quad (14.35)$$

$$= z + \alpha p y (y - \tilde{y}), \quad (14.36)$$

donde y y \tilde{y} denotan respectivamente la posición deseada y real del ángulo de la articulación del robot, respectivamente. Si el robot no puede seguir el movimiento deseado, $\alpha p x (y - \tilde{y})$ se vuelve grande, lo que a su vez hace que el cambio de fase \dot{x} sea pequeño. Así, la evolución de la fase se detiene hasta que el robot alcanza la configuración y deseada. Esta voluntad

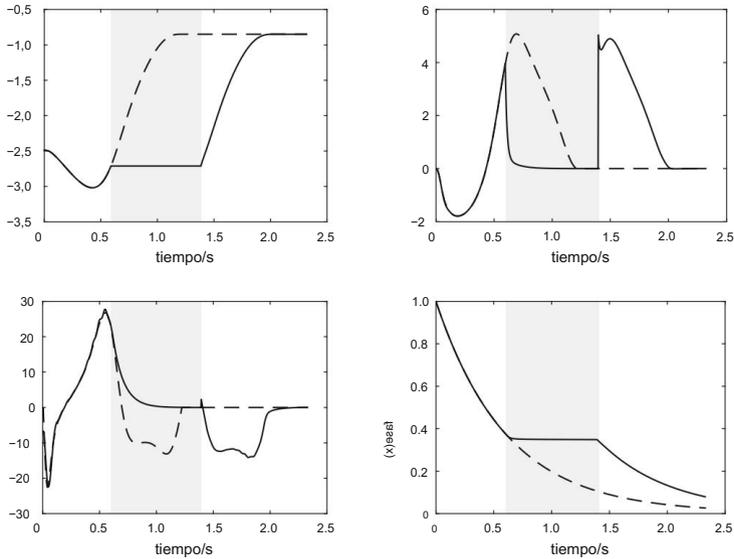


Fig. 14.11 El efecto de la interrupción de la fase causado por el bloqueo de la evolución de la posición conjunta y en el intervalo de tiempo $[0.6, 1.4]$ (área gris). Las trayectorias discontinuas muestran el DMP original, la velocidad, la aceleración y la evolución de fase, mientras que las trayectorias sólidas muestran sus contrapartes del movimiento perturbado con la parada de fase habilitada. Tenga en cuenta que fuera del intervalo de tiempo $[0.6, 1.4]$ en el que se bloquea el movimiento de la articulación, el robot sigue con precisión el movimiento deseado

eventualmente sucederá debido al término agregado en la ecuación. (14.36). Por otro lado, si el robot sigue con precisión el movimiento deseado, entonces $\tilde{y} - y \approx 0$ y las Ecs. (14.35) y (14.36) no son diferentes de las ecuaciones. (14.20) y (14.23), respectivamente. Así, en este caso, el movimiento generado por DMP no se altera. La figura 14.11 ilustra el efecto de la detención de fase cuando el movimiento del robot se bloquea temporalmente.

En resumen, los DMP proporcionan una representación eficaz para el aprendizaje de trayectorias de robots humanoides y para controlar robots humanoides. Se basan en ecuaciones diferenciales no lineales y autónomas que garantizan la creación de políticas de control cinemático uniformes. Una propiedad importante de los DMP es que se pueden aprender con una sola demostración de la tarea deseada. Tienen varias ventajas en comparación con otras representaciones motoras que incluyen

- poseen parámetros libres que son fáciles de aprender para reproducir cualquier deseado movimiento,
- no dependen explícitamente del tiempo y permiten la modulación del tiempo,
- son resistentes a las perturbaciones,
- son fáciles de modular adaptando varios parámetros y ecuaciones.

Debido a su flexibilidad y robustez, los DMP se consideran un método de elección cuando se aprenden trayectorias de robots a partir de demostraciones individuales.

Capítulo 15

Precisión y repetibilidad de manipuladores industriales



En este capítulo consideraremos brevemente los criterios de desempeño y los métodos para probar los manipuladores de robots industriales como se describe en la norma ISO 9283. Antes de abordar la precisión y la repetibilidad de los manipuladores industriales, resumiremos la información básica sobre los manipuladores de robots.

Los datos básicos del robot suelen incluir un dibujo esquemático de la estructura mecánica del robot:

- robot cartesiano (Fig. 15.1 izquierda), • robot cilíndrico (Fig. 15.1 derecha), • robot polar (esférico) (Fig. 15.2 izquierda), • robot antropomórfico (Fig. 15.2 derecha), • robot SCARA (Fig. 15.3).

En todos los dibujos se deben marcar los grados de libertad del mecanismo del robot. El dibujo debe incluir también el marco de coordenadas base y el marco de la interfaz mecánica que determina el fabricante.

De especial importancia es el diagrama que muestra los límites del espacio de trabajo (Fig. 15.4). El alcance máximo del brazo del robot debe mostrarse claramente en al menos dos planos. Se debe indicar el rango de movimiento de cada eje del robot (grado de libertad). El fabricante debe especificar también el centro del espacio de trabajo c_w , donde tienen lugar la mayoría de las actividades del robot.

Los datos del robot deben ir acompañados de los parámetros de carga característicos, como masa (kg), par (Nm), momento de inercia (kgm^2) y empuje (N). La velocidad máxima debe darse a una tasa constante, cuando no hay aceleración o desaceleración. Las velocidades máximas para ejes de robot particulares deben darse con la carga aplicada al efector final. También se debe presentar la resolución del movimiento de cada eje (mm°), descripción del sistema de control y los métodos de programación.

Los tres marcos de coordenadas del robot más relevantes (diestros) se muestran en la Fig. 15.5. El primero es el marco de coordenadas universales x_0 - y_0 - z_0 . El origen del marco lo define el usuario. El eje z_0 es paralelo al vector de gravedad, pero en dirección opuesta. El segundo es el marco de coordenadas base x_1 - y_1 - z_1 , cuyo origen lo define el fabricante. Sus ejes están alineados con el segmento base del robot.

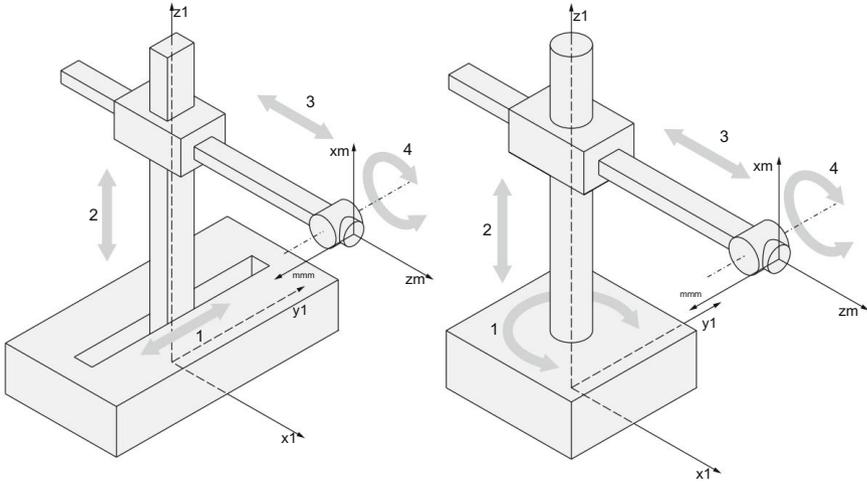


Fig. 15.1 Estructuras mecánicas del robot cartesiano (izquierda) y el robot cilíndrico (derecha)

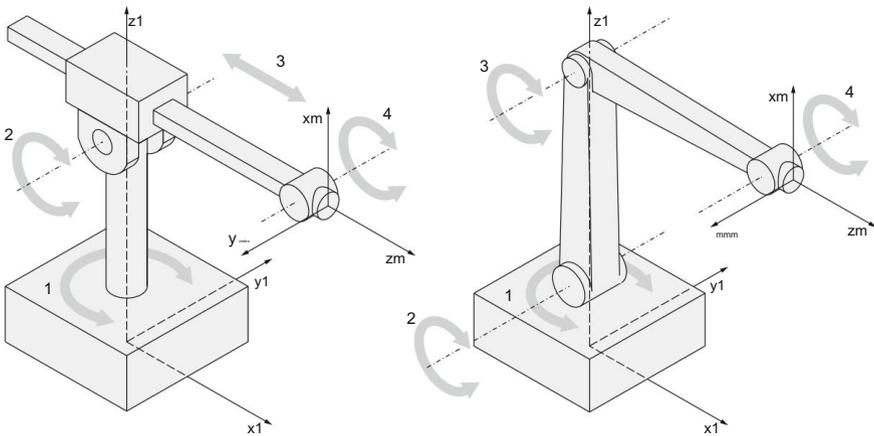


Fig. 15.2 Estructura mecánica del robot polar (izquierda) y el robot antropomórfico (derecha)

El eje positivo z_1 apunta perpendicularmente hacia afuera de la superficie de montaje de la base.

El eje x_1 pasa por la proyección del centro del espacio de trabajo del robot c_w .

El marco $x_m-y_m-z_m$ se denomina marco de coordenadas de la interfaz mecánica. Su origen se sitúa en el centro de la interfaz mecánica (palma del robot) que conecta el brazo del robot con la pinza. El eje z_m positivo apunta desde la interfaz mecánica hacia el efector final. El eje x_m está ubicado en el plano definido por la interfaz, que es perpendicular al eje z_m .

Las direcciones positivas de los movimientos del robot, especificadas como los desplazamientos de traslación y rotación, se muestran en la figura 15.6.

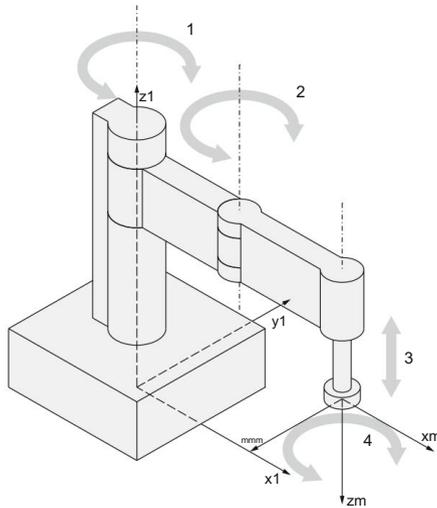


Fig. 15.3 Estructura mecánica del robot SCARA

La norma ISO 9283 se ocupa de los criterios y métodos para probar los manipuladores de robots industriales. Este es el estándar más importante ya que facilita el diálogo entre fabricantes y usuarios de los sistemas de robot. Define la forma en que se deben probar las características de rendimiento particulares de un manipulador de robot. Las pruebas se pueden realizar durante la fase de aceptación del robot o en varios períodos de uso del robot para verificar la precisión y repetibilidad de los movimientos del robot.

Las características del robot, que afectan significativamente el desempeño de una tarea de robot, son las siguientes:

- Exactitud y repetibilidad de la pose (la pose se define como la posición y la orientación de un segmento particular del robot, por lo general el efector final),
- precisión y repetibilidad de la distancia,
- tiempo de estabilización de la pose,
- sobreimpulso de la pose,
- deriva de la precisión y repetibilidad de la pose.

Estos parámetros de rendimiento son importantes en las tareas de robot punto a punto. Se definen parámetros similares para los casos en que el efector final del robot se mueve a lo largo de una trayectoria continua. Estos parámetros no se considerarán en este libro y se pueden encontrar en los documentos originales.

Al probar la precisión y repetibilidad de un mecanismo de robot, dos términos son importantes, a saber, el grupo y el baricentro del grupo. El grupo se define como un conjunto de poses de efector final logradas, correspondientes a la misma pose de comando.

El baricentro es un punto cuyas coordenadas son los valores medios de las coordenadas x , y y z de todos los puntos del grupo. Los datos medidos de posición y orientación deben expresarse en un marco de coordenadas paralelo al marco base.

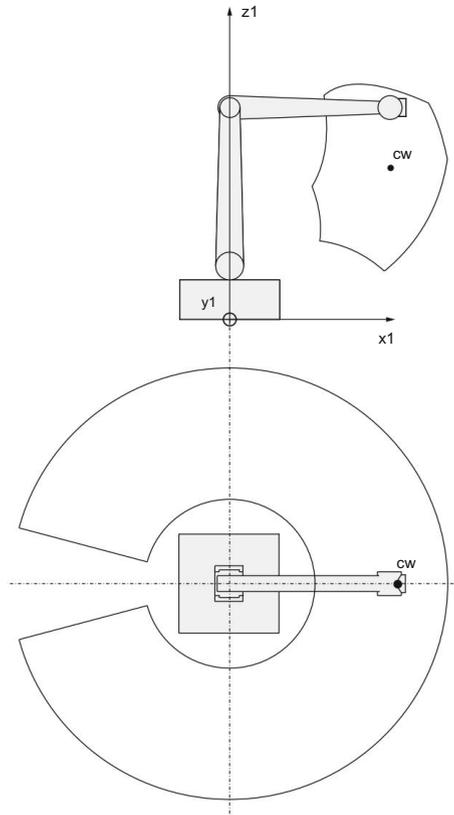


Fig. 15.4 Espacio de trabajo del robot

El punto de medición debe estar lo más cerca posible del origen del marco de la interfaz mecánica. Se recomiendan métodos de medición óptica sin contacto. La instrumentación de medición debe estar adecuadamente calibrada. Las pruebas de precisión y repetibilidad del robot deben realizarse con la carga máxima en el efector final y la velocidad máxima entre los puntos especificados.

El estándar define las poses que deben ser probadas. Las mediciones deben realizarse en cinco puntos, ubicados en un plano que se coloca en diagonal dentro de un cubo (Fig. 15.7). También se especifica la pose del cubo en el espacio de trabajo del robot. Debe estar ubicado en la parte del espacio de trabajo donde se anticipan la mayoría de las actividades del robot. El cubo debe tener el volumen máximo permitido en el espacio de trabajo del robot y sus bordes deben ser paralelos al marco de coordenadas base. El punto P1 está ubicado en la intersección de las diagonales en el centro del cubo. Los puntos P2 – P5 están ubicados a una distancia de las esquinas del cubo igual al $10\% \pm 2\%$ de la longitud de la diagonal L. La norma también determina el número mínimo de ciclos que se deben realizar al probar cada parámetro característico:

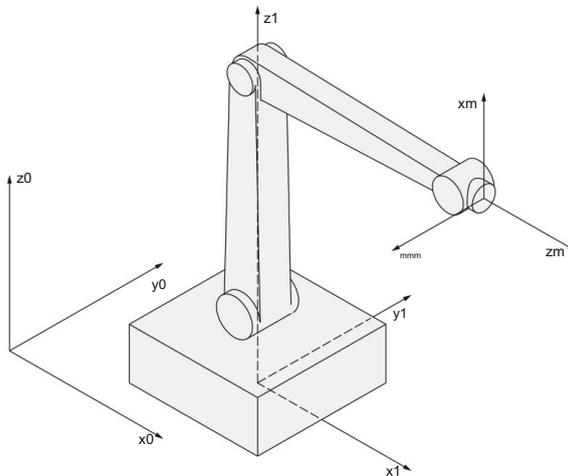


Fig. 15.5 Los marcos de coordenadas del manipulador de robot

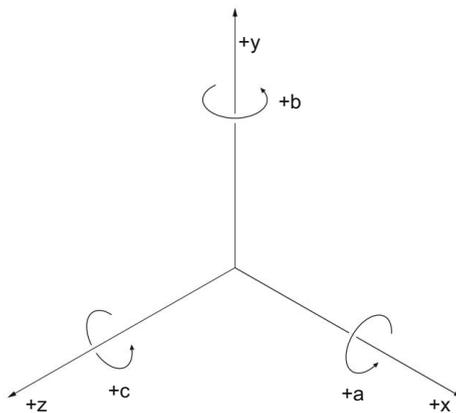


Fig. 15.6 Direcciones positivas de los desplazamientos de traslación y rotación

- Precisión y repetibilidad de pose: 30 ciclos, •
- Precisión de distancia y repetibilidad: 30 ciclos, •
- Tiempo de estabilización de pose: 3
- ciclos, • Rebasamiento de
- pose: 3 ciclos, • Deriva de precisión y repetibilidad de pose: ciclos continuos durante 8 h.

Al probar la precisión y repetibilidad de las poses del efector final, debemos distinguir entre la llamada pose de comando y la pose alcanzada (Fig. 15.8).

La pose de comando es la pose deseada, especificada a través de la programación del robot o la entrada manual de las coordenadas deseadas usando una consola portátil. La pose lograda es la pose realmente lograda del efector final del robot en respuesta al comando

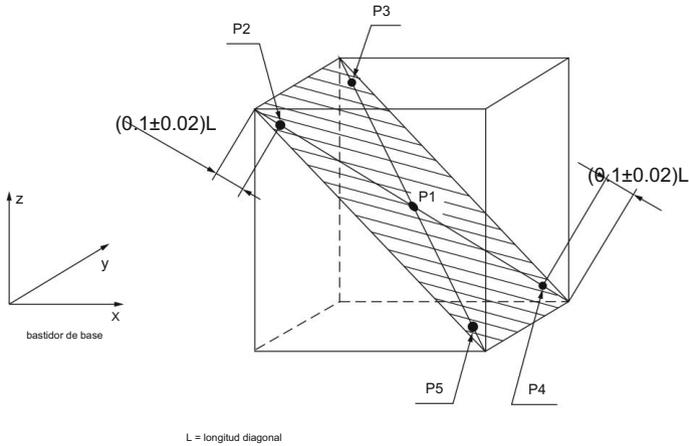


Fig. 15.7 El cubo con los puntos a probar

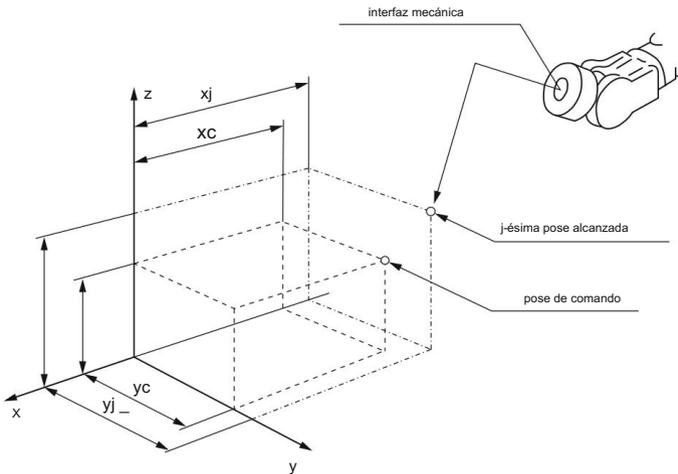


Fig. 15.8 La pose de mando y la pose del efector final obtenida

pose. La precisión de la pose evalúa las desviaciones que ocurren entre el comando y la pose obtenida. La repetibilidad de pose estima las fluctuaciones en las poses obtenidas para una serie de visitas repetidas a la misma pose de comando. La precisión y la repetibilidad de la pose son, por lo tanto, muy similares a la precisión y la repetibilidad de los disparos repetitivos a un objetivo. Las razones de las desviaciones son: errores causados por el algoritmo de control, errores de transformación de coordenadas, diferencias entre las dimensiones de la estructura mecánica del robot y el modelo de control del robot, fallas mecánicas, como histéresis o fricción, e influencias externas como la temperatura

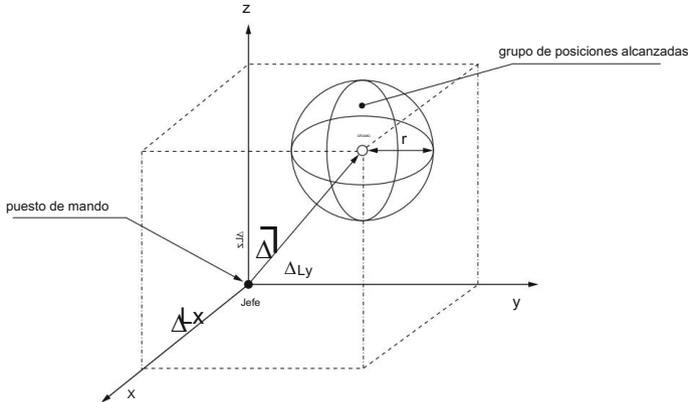


Fig. 15.9 Precisión y repetibilidad de la posición

La precisión de la pose se define como la desviación entre la pose de comando y el valor medio de las poses obtenidas cuando el efector final se acercaba a la pose de comando desde la misma dirección. La precisión de la posición y la orientación se tratan por separado. La precisión de la posición está determinada por la distancia entre la pose de comando y el baricentro del grupo de poses alcanzadas (Fig. 15.9). La precisión de posición $L = [L_x \ L_y \ L_z]^T$ se expresa mediante la siguiente ecuación

$$L = \sqrt{(x^- - x_c)^2 + (y^- - y_c)^2 + (z^- - z_c)^2}, \quad (15.1)$$

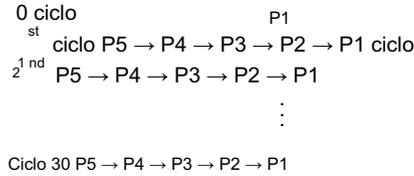
donde (x^-, y^-, z^-) son las coordenadas del baricentro del cúmulo, obtenidas promediando los 30 puntos de medición, evaluados al repetir los movimientos en la misma pose de comando O_c con las coordenadas (x_c, y_c, z_c) .

La precisión de orientación es la diferencia entre la orientación angular comandada y el promedio de las orientaciones angulares obtenidas. Se expresa por separado para cada eje del marco de coordenadas base. La precisión de orientación alrededor del eje z tiene la siguiente forma

$$L_c = C^- - C_c, \quad (15.2)$$

donde C^- es el valor medio de los ángulos de orientación alrededor del eje z, obtenido en 30 medidas al intentar alcanzar el mismo ángulo de comando C_c . Se escriben ecuaciones similares para la precisión de la orientación alrededor de los ejes x e y.

El estándar define exactamente también el curso de las mediciones. El robot parte del punto P1 y se mueve a los puntos P5, P4, P3, P2, P1. Cada punto se alcanza siempre desde la misma dirección.



Para cada punto se calcula la precisión de posición L y las precisiones de orientación L_a , L_b y L_c .

Para la misma serie de mediciones también debe determinarse la repetibilidad de la pose. La repetibilidad de la pose expresa la proximidad de las posiciones y orientaciones de las 30 poses obtenidas al repetir los movimientos del robot en la misma pose de comando. La repetibilidad de la posición (Fig. 15.9) está determinada por el radio de la esfera r cuyo centro es el baricentro del grupo. El radio se define como

$$r = D^- + 3SD. \quad (15.3)$$

El cálculo del radio r según la Ec. (15.3) se explica con más detalle mediante las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned}
 D^- &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j \\
 D_j &= \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \\
 DE &= \frac{\sum_{j=1}^n (D_j - D^-)^2}{n-1}.
 \end{aligned} \quad (15.4)$$

En las ecuaciones anteriores, nuevamente seleccionamos $n = 30$, mientras que (x_j, y_j, z_j) son las coordenadas de la j -ésima posición alcanzada.

La repetibilidad de la orientación para el ángulo alrededor del eje z se presenta en la figura 15.10. La repetibilidad de la orientación expresa cuán dispersos están los 30 ángulos obtenidos alrededor de su promedio para el mismo ángulo de comando. Se describe por las desviaciones estándar triples. Para el ángulo alrededor del eje z tenemos

$$rc = \pm 3Sc = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (C_j - \bar{C})^2}{n-1}}. \quad (15.5)$$

En la ecuación. (15.5) C_j representa el ángulo medido en la j -ésima pose alcanzada. El curso de las mediciones es el mismo que en las pruebas de precisión. El radio r y las desviaciones angulares r_a , r_b y r_c se calculan para cada pose por separado.

La precisión de la distancia y la repetibilidad se prueban de manera similar. La precisión de la distancia cuantifica las desviaciones que se producen en la distancia entre dos posiciones de mando y dos conjuntos de posiciones medias alcanzadas. La repetibilidad de la distancia

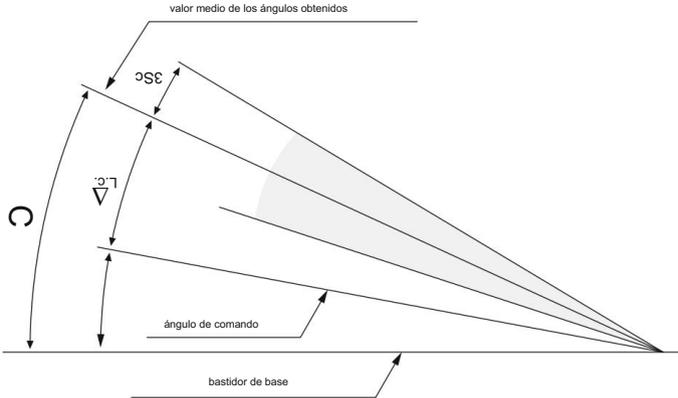


Fig. 15.10 Precisión de orientación y repetibilidad.

determina las fluctuaciones en las distancias para una serie de movimientos repetidos del robot entre dos puntos seleccionados. La precisión de la distancia se define como la desviación entre la distancia de comando y la media de las distancias alcanzadas (Fig. 15.11). Suponiendo que P_{c1} y P_{c2} son el par de posiciones comandadas y que P_{1j} y P_{2j} son el j -ésimo par de los 30 pares de posiciones alcanzadas, se define la precisión de distancia B como

$$\text{segundo} = re - re^- \tag{15.6}$$

dónde

$$CC = P_{c1} - P_{c2} = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2}$$

$$D^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j$$

$$D_j = P_{1j} - P_{2j} = \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2}$$

En las ecuaciones anteriores que describen la precisión de la distancia, $P_{c1} = (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ y $P_{c2} = (x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})$ representan el par de posiciones deseadas mientras que $P_{1j} = (x_{1j}, y_{1j}, z_{1j})$ y $P_{2j} = (x_{2j}, y_{2j}, z_{2j})$ son el par de posiciones alcanzadas. La prueba de precisión de distancia se realiza con la carga máxima del efector final del robot, que debe desplazarse 30 veces entre los puntos P2 y P4 del cubo de medición. La repetibilidad de la distancia RB se define como

$$BR = \pm 3 \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (D_j - D^-)^2}}{n - 1} \tag{15.7}$$

Consideremos otros cuatro parámetros característicos que deben probarse en robots industriales que se mueven de un punto a otro. El primero es la estabilización de pose.

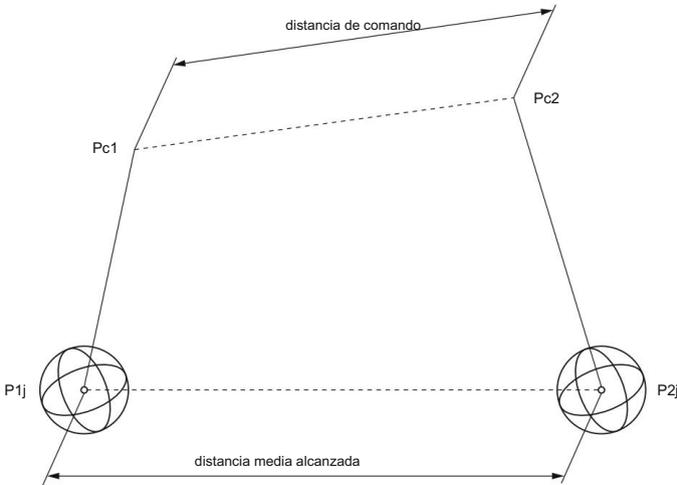


Fig. 15.11 Precisión de distancia

tiempo. El tiempo de estabilización es el intervalo de tiempo entre el instante en que el robot da la señal de "postura alcanzada" y el instante en que es oscilatorio o amortiguado el movimiento del efector final del robot cae dentro de un límite especificado por el fabricante. La definición del tiempo de estabilización de la pose es evidente en la figura 15.12. la prueba es realizado a la máxima carga y velocidad. Los cinco puntos de medición se visitan en el siguiente orden $P1 \rightarrow P2 \rightarrow P3 \rightarrow P4 \rightarrow P5$. Para cada pose el valor medio de se calculan tres ciclos.

Un parámetro similar es el sobreimpulso de pose, que también se muestra en la figura 15.12. la pose overshoot es la desviación máxima entre la trayectoria del efector final que se aproxima y la pose alcanzada después de que el robot haya dado la señal de "pose alcanzada". En la figura 15.12 un sobreimpulso negativo se muestra en el primer ejemplo y un sobreimpulso positivo en el segundo ejemplo El instante $t = 0$ es el momento en que la señal de "postura alcanzada" fue entregado. Las condiciones de medición son las mismas que cuando se prueba la estabilización. tiempo.

Los dos últimos parámetros a probar en el robot manipulador industrial en movimiento de punto a punto son la deriva de la precisión de la pose y la deriva de la repetibilidad de la pose. La deriva de la precisión de posición L_{DR} Se define como

$$L_{DR} = |L_{t=0} - L_{t=T}|, \quad (15.8)$$

donde $L_{t=0}$ y $L_{t=T}$ son los valores de precisión de posición en el tiempo $t = 0$ y el tiempo $t=T$, respectivamente. La deriva de la precisión de orientación $L_{\text{_____}}$ es igual a

$$L_{\text{_____}} = L_{c,t=0} - L_{c,t=T}, \quad (15.9)$$

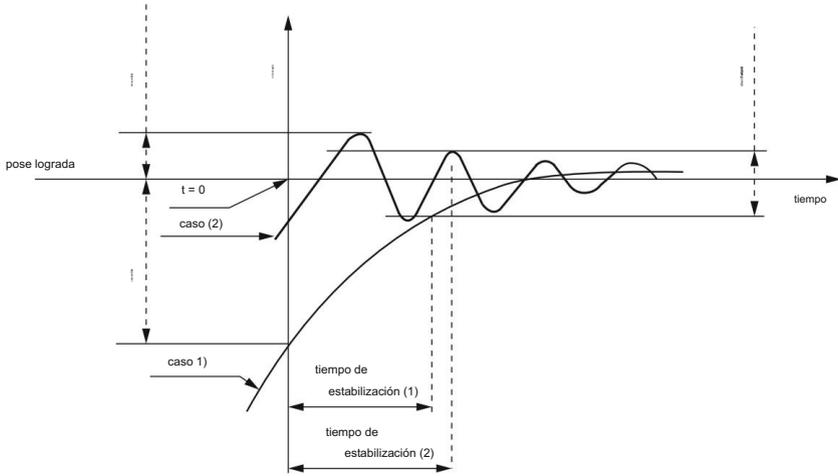


Fig. 15.12 Tiempo de estabilización de pose y rebasamiento

donde $L_{c,t=0}$ y $L_{c,t=T}$ son los valores de precisión de orientación en el tiempo $t = 0$ y el tiempo $t=T$, respectivamente. La deriva de la repetibilidad de la posición se define mediante la siguiente ecuación

$$rDR = r_{t=0} - r_{t=T}, \quad (15.10)$$

donde $r_{t=0}$ y $r_{t=T}$ son los valores de repetibilidad de posición en el tiempo $t = 0$ y el tiempo $t=T$, respectivamente. La deriva de la repetibilidad de la orientación es para la rotación alrededor del eje z definida como

$$rDRC = r_{c,t=0} - r_{c,t=T}, \quad (15.11)$$

donde $r_{c,t=0}$ y $r_{c,t=T}$ son los valores de repetibilidad de la orientación en el tiempo $t = 0$ y el tiempo $t=T$, respectivamente. Las mediciones se realizan a la máxima carga y velocidad del robot. El robot se desplaza cíclicamente entre los puntos P4 y P2. Los movimientos cíclicos duran ocho horas. Solo se toman medidas en el punto P4.

Apéndice A

Derivación de la Aceleración en Circular

Movimiento

Recordemos primero las definiciones de vector de posición, velocidad y aceleración de una partícula. En un marco de referencia dado (es decir, un sistema de coordenadas), la posición de una partícula viene dada por un vector que se extiende desde el origen del marco de coordenadas hasta la posición instantánea de la partícula. Este vector podría ser una función del tiempo, especificando así la trayectoria de la partícula.

$$\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t), z(t)). \quad (\text{A.1})$$

La velocidad de la partícula se define como el cambio de posición por unidad de tiempo

$$\mathbf{v} = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}. \quad (\text{A.2})$$

La aceleración se define como el cambio de velocidad por unidad de tiempo,

$$\mathbf{a} = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}. \quad (\text{A.3})$$

Observamos que esta es una ecuación vectorial, por lo que el cambio en la velocidad se refiere tanto a un cambio en la magnitud de la velocidad como a un cambio en la dirección de la velocidad.

El movimiento circular se describe mediante un vector giratorio $\mathbf{r}(t)$ de longitud fija, $|\mathbf{r}| = r$ constante. El vector de posición está así determinado por el radio del círculo r y por el ángulo $\theta(t)$ de \mathbf{r} con respecto al eje x (Fig. A.1).

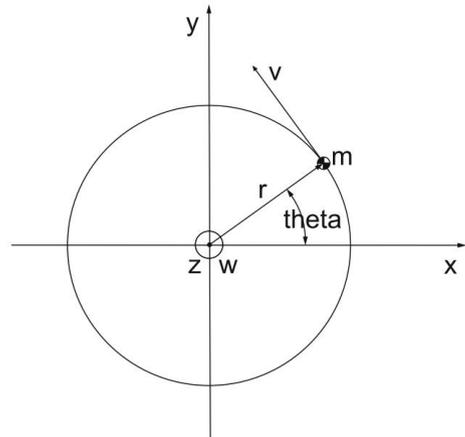
Introduzcamos ahora un conjunto de tres vectores unitarios ortogonales: \mathbf{e}_r en la dirección de \mathbf{r} , \mathbf{e}_θ en la dirección de la tangente a la circunferencia y \mathbf{e}_z en la dirección del eje z . La relación entre los tres vectores unitarios viene dada por $\mathbf{e}_\theta = \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_r$.

Definimos el vector de velocidad angular como siendo perpendicular al plano de la trayectoria circular con magnitud igual a la derivada temporal del ángulo θ

$$\boldsymbol{\omega} = \dot{\theta} \mathbf{e}_z. \quad (\text{A.4})$$

Procedamos a calcular la velocidad

Fig. A.1 Parámetros y variables en movimiento circular



$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (\text{A.5})$$

La dirección de la velocidad viene dada por la tangente al círculo: $\mathbf{e}_t = \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_r$. La magnitud de la velocidad está dada por la longitud del arco circular infinitesimal $ds = r d\theta$ dividido por el tiempo infinitesimal dt , que la partícula requiere para recorrer este camino

$$\frac{ds}{dt} = r \frac{d\theta}{dt} = r \dot{\theta} \quad (\text{A.6})$$

Incluyendo la dirección tangencial de la velocidad se obtiene

$$\mathbf{v} = r\dot{\theta}\mathbf{e}_t = \dot{\theta}\mathbf{e}_z \times r\mathbf{e}_r = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (\text{A.7})$$

Para obtener la aceleración, calculamos la derivada temporal de la velocidad

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \quad (\text{A.8})$$

Derivamos el producto vectorial como se diferenciaría un producto normal de dos funciones

$$\mathbf{a} = \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (\text{A.9})$$

Definiendo la aceleración angular $\boldsymbol{\alpha}$ como la derivada temporal de la velocidad angular $\boldsymbol{\alpha} = \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$, vemos que el primer término corresponde a la aceleración tangencial

$$\mathbf{a}_t = \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{r} \quad (\text{A.10})$$

En el segundo término insertamos la expresión para la velocidad

$$\frac{dr}{dt} = v = \omega \times r, \quad (\text{A.11})$$

y obtenemos un doble producto vectorial $\omega \times (\omega \times r)$. Usando la identidad $a \times (b \times c) = b(a \cdot c) - c(a \cdot b)$ del álgebra vectorial y notando que ω y r son ortogonales, obtenemos para el segundo término en la ecuación de aceleración

$$\omega \times \frac{dr}{dt} = \omega \times (\omega \times r) = \omega(\omega \cdot r) - r(\omega \cdot \omega) = -\omega^2 r, \quad (\text{A.12})$$

que es la componente radial (o centrípeta) de la aceleración. Así que finalmente tenemos

$$a = a_n + a_t = -\omega^2 r - \dot{\omega} r. \quad (\text{A.13})$$

Otras lecturas

1. Bajd T, Mihelj M, Munih M (2013) Introducción a la robótica, Springer
2. Craig JJ (2005) Introducción a la robótica: mecánica y control, Pearson Prentice Hall
3. Kajita S, Hirukawa H, Harada K, Yokoi K (2014) Introducción a la robótica humanoide, Springer
4. Klančar G, Zdešar A, Blažič S, Škrjanc I (2017) Robótica móvil con ruedas - From Fundamentals Towards Autonomous Systems, Elsevier
5. Lenarčič J, Bajd T, Stanišič MM (2013) Robot Mechanisms, Springer
6. Merlet JP (2006) Parallel Robots (Segunda edición), Springer
7. Mihelj M, Podobnik J (2012) Hápticas para Realidad Virtual y Teleoperación, Saltador
8. Mihelj M, Novak D, Beguš S (2014) Tecnología y aplicación de realidad virtual, Springer
9. Natale C (2003) Interaction Control of Robot Manipulators, Springer
10. Nof SY (1999) Handbook of Industrial Robotics, John Wiley & Sons
11. Paul RP (1981) Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, La prensa del MIT
12. Scivico L, Siciliano B (2002) Modelado y control de manipuladores de robots, Saltador
13. Spong MW, Hutchinson S, Vidyasagar M (2006) Modelado y control de robots, John Wiley e hijos
14. Tsai LW (1999) Análisis de robots: la mecánica de la manipulación en serie y en paralelo, John Wiley & Sons
15. Xie M (2003) Fundamentos de la robótica: vinculación de la percepción con la acción, World Científico

Índice

A

Aceleración

- angular, [62](#), [244](#)
- centrípeta, [62](#), [245](#)
- radial, [62](#), [245](#)
- tangencial, [62](#), [244](#)

Acelerómetro, [94](#)

Precisión

- distancia, [239](#)
- deriva, [233](#), [240](#)
- orientación, [237](#)
- pose, [233](#), [235](#)
- posición, [237](#)

Actuador

- flexible, serie
- [175](#) elástico, [175](#)
- rigidez variable, [175](#)

robot antropomórfico, [6](#), [231](#)

Aplicación

- guiada a mano, [187](#)
- ventana de entrega, [185](#)

Asamblea, [147](#)

Punto de

- atracción, [222](#), [226](#)

Vehículo de guiado automático, [189](#)

B

Proyección hacia atrás, [110](#), [113](#), [114](#) basado en modelo, [115](#)

Equilibrio, [210](#)

parachoques, [98](#)

C

Cámara, [185](#)

- calibración, [114](#), [118](#)

patrón de calibración, [118](#)

punta de calibración,

[118](#) parámetros extrínsecos,

[114](#) parámetros intrínsecos, [112](#)

robot cartesiano, [231](#)

Centro de Masa (COM), [214](#), [215](#)

Cadena cinemática cerrada, [69](#)

cobot, [9](#)

aplicación

colaborativa, [185](#)

pinza, [184](#)

operación, [173](#), [177](#)

robot, [157](#), [173](#), [175](#), [184](#)

espacio de trabajo, [174](#), [186](#)

Colisión, [175](#)

Cumplimiento, [175](#)

Restricciones, [71](#), [77](#)

Contacto

cuasi-estático, [182](#)

transitorio, [182](#)

sensor de contacto, [96](#)

Control, [133](#)

admitancia, [176](#)

fuerza, [133](#), [147](#), [149](#), [151](#)

compensación de gravedad, [136](#), [137](#), [144](#)

impedancia, [176](#)

dinámica inversa, [137](#), [139](#), [144](#), [148](#), [152](#)

jacobiano inverso, [143](#)

orientación, [202](#)

composición paralela, [151](#)

posición, [133](#)

posición y orientación, [203](#) derivada

proporcional, [135](#), [136](#), [144](#) torque, [176](#)

jacobiano

transpuesto, [142](#)

transportador, [164](#)

- accionado por correa,
 - 165 cadena,
 - 164 cadena de metal,
 - 164 rodillo, 165
 - cinta transportadora, 158
 - Cooperación, 173
 - Marco de coordenadas
 - base, 231
 - cámara, 109
 - global, 189, 194, 200, 204, 206 imagen,
 - 109 índice,
 - 111 local,
 - 191 interfaz
 - mecánica, 232 referencia, 23, 31
 - robot, 208 mundo,
 - 133, 231
 - Coordenadas
 - externa, 49, 80, 133, 141, 145, 151, 152 imagen, 111
 - índice, 110
 - interna, 49,
 - 133 articulación, 80
 - Coriolis, 68
 - Tiempo de ciclo, 159
 - Cilindro
 - neumático, 158
 - Robot cilíndrico, 231
- D
- peligro, 153
 - Grados de libertad, 5, 6, 210, 217
 - Robot delta, 69, 75
 - Accionamiento diferencial, 192
 - Desplazamiento, 16
 - Distancia
 - de frenado, 180
 - intrusión, 180
 - separación de protección, 180
 - parada, 180
 - Primitivas de movimiento dinámico (DMP), 221, 223
 - estimación, 225
 - modulación, 227
 - Sistema dinámico
 - lineal, 222
- mi
- Pinza eléctrica, 167
 - Codificador
 - magnético, 92
 - óptico, 89
- Efecto final, 133, 142, 149, 160
 - Ángulos de Euler, 39, 218
 - Exoesqueleto, 2, 3
 - pasivo, 220
- F
- Prevención de fallas, 154
 - Alimentador,
 - 160 cargador, 163
 - parte, 163
 - vibratorio, 163
 - cuenco vibratorio, 163
 - vibratorio en línea, 164
 - Dispositivo de alimentación, 160
 - Resorte
 - de dedos, 167
 - Accesorio, 160
 - contacto
 - de fuerza, 148, 149, 152
 - reacción de tierra, 211
 - límite, 177, 181
 - magnético, 170
 - admisible, 183
 - Sensor de fuerza y par, 98
 - Sensor de fuerza, 98
 - Término forzoso, 223
 - Proyección hacia delante, 108, 114
-
- Agarrar
- por la fuerza, 167
 - por la forma, 167
 - confiable, 167
- Gravedad, 68
- Pinza, 39, 41, 46, 165 eléctrica,
 - 167 hidráulica,
 - 167 magnética,
 - 169 de varios
 - dedos, 166 neumática,
 - 167 de dos dedos,
 - 166 de vacío, 168
- Dispositivo de guía, 178
- Soldadura por puntos con
 - pistola, 171 soldadura, 171
 - giroscopio, 94
- H
- Guía manual, 177, 178, 220
 - Robot háptico, 2

Captura de movimiento humano, [217](#)
 Robot humanoide, [3](#), [209](#), [210](#)
 Pinza hidráulica, [167](#)

I

Coordenadas de la imagen, [111](#)
 Plano de imagen, [109](#)
 Procesamiento de imágenes, [118](#)
 Aprendizaje por imitación, [210](#), [216](#), [217](#)
 Inclinómetro, [94](#)
 Coordenadas índice, [110](#)
 Inercia, [68](#)
 Unidad de medida inercial, [94](#), [96](#), [219](#)
 Centro instantáneo de rotación, [193](#)
 Ventana de interfaz, [186](#)

j

Sensor de par de articulación, [101](#)

k

Par cinemático, [27](#)
 Cinemática, [49](#)
 directa, [49](#), [51](#), [73](#), [80](#), [214](#)
 inversa, [49](#), [51](#), [73](#), [80](#)

L

Telómetro láser, [103](#)
 Escáner láser, [104](#)
 Pierna, [70](#)
 LiDAR, [105](#)
 Interruptor de límite, [98](#)
 Localización, [189](#), [197](#) guía
 inductiva, [197](#) láser, [197](#)
 punto
 magnético, [197](#) cinta
 magnética, [197](#) natural,
 [197](#) odometría,
 [199](#) basada en
 radio, [199](#) cable, [197](#)

Locomoción

bípeda, [210](#), [211](#)
 fase de apoyo doble, [213](#) fase
 de apoyo simple, [213](#) fase de
 apoyo, [213](#) fase de
 balanceo, [213](#) patrón
 de marcha, [213](#)

METRO

Máquina

indexación, [159](#)

Imán

electroimán, [169](#)
 permanente, [170](#)

Codificador magnético, [92](#)

Pinza magnética, [169](#)

Magnetómetro, [94](#)

Transformación homogénea de matrices, [11](#), [13](#), [16](#),
[20](#), [27](#)

Jacobiano, [51](#), [55](#), [142–144](#), [148](#)
 rotación, [13](#), [39](#), [42](#)

robot móvil, [1](#), [189](#), [191](#) carretilla

elevadora móvil, [189](#)

remolcador,

[189](#) cargador unitario, [189](#)

Modelo

dinámico, [136](#), [138](#), [148](#), [176](#)

geométrico, [19](#), [24](#)

cinemático, [142](#)

Control de velocidad y separación, [177](#)

NOTE

Nanorobot, [1](#)

Navegación, [189](#), [197](#)

O

Evasión de obstáculos, [205](#)

Odometría, [199](#)

Omnidireccional, [190](#)

Operación

colaborativa, [173](#).

Operador, [174](#)

Codificador óptico, [89](#)

absoluto, [89](#)

incremental, [91](#)

Orientación, [6](#), [16](#), [39](#)

Rebasamiento,

[240](#) pose, [233](#)

PAG

Palé, [158–160](#)

moldeado por inyección,

[161](#) metal,

[161](#) formado al vacío, [161](#)

Robot paralelo, [69](#), [73](#), [76](#), [80](#)

Part-holder, [159](#)

control de ruta, [202](#)

Seguimiento de camino, [207](#)

Planificación de caminos, [189](#), [201](#)

Ecuación matricial de perspectiva, [110](#)

Proyección en perspectiva, [108](#), [110](#)

Fase

evolución, [228](#)

variable, [223](#), [228](#)

Plataforma, [70](#)

Cilindro neumático, [158](#)

Pinza neumática, [167](#)

Punto

final, [126](#), [129](#)

inicial, [126](#), [129](#) vía,

[126](#), [128](#), [129](#)

Punto a punto, [123](#), [223](#), [226](#)

Pose, [6](#), [16](#)

inicial, [23](#), [29](#), [31](#), [35](#)

Posición, [6](#), [16](#)

Potenciómetro, [87](#)

Presión

permitido, [183](#)

línea de producción, [158](#)

asíncrono, [159](#) híbrido,

[158](#) en línea,

[158](#) rotativo,

[158](#) síncrono,

[159](#)

Programación por demostración, [210](#), [217](#)

Proyección

hacia atrás, [110](#), [113](#)–[115](#) hacia

adelante, [108](#), [114](#)

perspectiva, [108](#), [110](#)

Sensor de proximidad, [102](#)

bomba

de vacío, [169](#)

venturi, [169](#)

q

Cuadrícóptero, [2](#)

Cuaternión, [39](#), [44](#), [45](#)

R

Sensor de distancia, [102](#)

Reductor, [86](#)

distancia de

repetibilidad,

[239](#) deriva, [233](#),

[240](#) orientación, [238](#)

pose, [233](#), [235](#), [238](#)

posición, [238](#)

Robo-ética, [3](#)

Robot

antropomórfico, [6](#), [231](#)

cartesiano, [231](#)

colaborativo, [9](#), [157](#), [173](#), [175](#), [184](#) cilíndrico,

[231](#)

Delta, [69](#), [75](#)

efector final, [160](#)

entorno, [153](#) háptico,

[2](#)

humanoide, [3](#), [209](#), [210](#)

industrial, [173](#), [174](#), [178](#) móvil,

[1](#), [189](#), [191](#) paralelo, [1](#),

[69](#), [73](#), [76](#), [80](#) rehabilitación, [2](#)

SCARA, [6](#), [22](#), [35](#), [231](#)

segmento, [27](#)

blando,

[9](#) esférico, [231](#)

sistema, [173](#)

sistema de visión, [160](#)

Brazo robótico, [4](#)

Célula robótica, [6](#), [8](#), [153](#)

Dinámica de robots, [60](#), [67](#)

Pinza robótica, [4](#)

Mano robótica, [9](#)

Robótica, [1](#)

humanoide, [209](#)

Articulación de robot,

[1](#), [4](#) prismática,

[4](#) giratoria, [4](#)

rotacional, [4](#)

traslacional, [4](#)

Robot manipulador, [1](#), [4](#), [6](#), [7](#)

Segmento de robot, [1](#), [4](#)

Vehículo robótico, [1](#)

Visión robótica, [107](#)

Muñeca robótica, [4](#)

Rotación, [6](#), [12](#), [16](#)

Matriz de rotación, [13](#), [39](#), [42](#)

ángulos RPY, [39](#), [42](#), [134](#)

S

Seguridad, [153](#)–[155](#)

peligro para la seguridad, [174](#)

robot SCARA, [6](#), [231](#)

Sensación

dolor, [182](#)

Sensor, [2](#), [4](#), [85](#)

parachoques,

[98](#) capacitivo, [185](#)

contacto, [96](#)

eléctrico, [85](#)

electromagnético, [85](#)

exteroceptivo, [85](#)

- fuerza, [98](#), [185](#)
- fuerza y par, [98](#), [175](#) inclinómetro, [94](#) unidad de medida
- inercial, [94](#) par articular, [101](#), [175](#)
- telémetro láser, [103](#) escáner láser, [104](#)

- LiDAR, [105](#)
- interruptor de límite, [98](#) codificador magnético, [92](#) óptico, [86](#) codificador óptico, [89](#) potenciómetro, [87](#) propioceptivo, [85](#) proximidad, [102](#) alcance, [102](#) clasificación de seguridad, [176](#) tacómetro, [93](#) táctil, [96](#), [175](#), [185](#) telémetro ultrasónico, [102](#)
- Disco de abstracción del sensor, [200](#)
- Localización y mapeo simultáneos (GOLPE), [200](#)
- Robot esférico, [231](#)
- Dedo elástico, [167](#)
- Tiempo de estabilización, [233](#), [240](#)
- Normas, [153](#)
- Estática, [54](#)
- Visión estéreo, [115](#)
- Plataforma Stewart-Gough, [69](#), [74](#), [78](#), [82](#)

- Detener emergencia, [178](#), [184](#) protección, [178](#)–[180](#) clasificación de seguridad monitoreada, [177](#)–[180](#), [182](#)
- Polígono de apoyo, [211](#), [214](#)

- T
- Esfera
 - de mesa, [159](#) giratoria, [161](#)
- Tacómetro, [93](#)
- Sensor táctil, [96](#)
 - capacitivo, [97](#)
 - basado en deformación, [97](#)
 - magnético, [98](#)
 - mecánico, [98](#)
 - óptico, [97](#)
 - piezoeléctrico, [97](#)
- Telemanipulador, [2](#), [3](#), [9](#)

- Soldadura con soplete, [171](#)
- Seguimiento
 - óptico, [217](#)
- Trayectoria, [123](#), [132](#)
 - interpolación, [126](#), [129](#)
 - planificación, [123](#)
- Traducción, [5](#), [12](#), [16](#)
- Perfil de velocidad trapezoidal, [123](#), [126](#)

- tu
- Telémetro ultrasónico, [102](#)
- Modelo de monociclo, [194](#)

- V
- Variable
 - rotacional, [29](#)
 - traslacional, [29](#)
- Entorno virtual, [2](#)
- Robot
 - de visión, [107](#)
- Sistema de visión, [158](#)

- W
- Andar
 - dinámico, [215](#)
 - estático, [215](#)
- Rueda, [190](#)
 - giratoria, [190](#)
 - fija, [190](#)
 - esférica, [190](#)
 - estándar direccional, [190](#)
 - sueco, [190](#)
- Área de trabajo, [58](#)
- Workspace, [6](#), [55](#), [153](#), [231](#)
 - colaborativo, [174](#), [186](#) diestro, [59](#) máximo, [174](#)
 - operativo, [174](#)
 - alcanzable, [59](#)
 - restringido, [174](#)
- sensor de muñeca, [98](#)

- Z
- Punto de momento cero (ZMP), [210](#), [211](#), [214](#)