

Capítulo 8

Componentes del robot

Gianmauro Fontana, Claudia Pagano y Marcello Valori

8.1 Implantación

La disponibilidad de tecnologías digitales, tanto en términos de hardware (sensores, altas capacidades de cómputo, PLC, etc.) y software (análisis de big data, inteligencia artificial, etc.) herramientas, permite el desarrollo de fábricas inteligentes avanzadas, basadas en el desarrollo sinérgico y la convergencia de la informática, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y la ciencia y la tecnología de fabricación. En una fábrica inteligente, se recopilan grandes cantidades de información en tiempo real de los diferentes procesos y máquinas en el piso de la fábrica a partir de sensores inteligentes. Posteriormente, estos datos se integran en el sistema de información, donde se analizan con el fin de mejorar la calidad y la eficiencia del sistema de producción que controla los actuadores. Los sistemas de producción e información se sincronizan constantemente para minimizar el tiempo de respuesta a eventos imprevistos.

Un robot es una máquina compleja compuesta de diferentes elementos que tienen diferentes funciones, como la arquitectura mecánica, actuadores, sensores y un sistema de control. Considerando el robot como una caja negra, una energía de entrada, debidamente modulada por comandos de entrada, se traduce en un movimiento coordinado de las partes mecánicas.

Para realizar esta tarea, la acción de un actuador se rige por el sistema de control, que puede modificar en tiempo real dicha acción combinando las lecturas del sensor con las tareas planificadas.

Un diagrama del proceso se describe en la Figura 8.1-1.

Este capítulo se centra en el principio básico y avanzado de detección y actuación de robots, ya que permiten el monitoreo y control del sistema físico que es la base de una fábrica inteligente.

G. Fontana, C. Pagano(✉), M. Valori
Instituto de Tecnologías y Sistemas Industriales Inteligentes para la Fabricación Avanzada,
Consejo Nacional de Investigación, Milán, Italia
correo electrónico: claudia.pagano@stiima.cnr.it

© Los Autores 2020
J.C. Chaplin et al. (eds), *Fabricación digital para pymes*

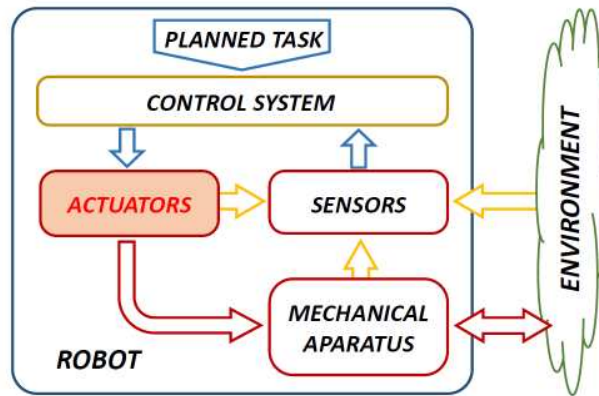


Figura 8.1-1 Diagrama de bloques de los componentes del robot.

Los sensores también se analizan en la sección 2 del capítulo 9 en el contexto de los gemelos digitales de sensores de fabricación. Sin embargo, desempeñan un papel esencial en los sistemas robóticos, por lo que se proporciona una discusión detallada en el contexto de la robótica en los siguientes párrafos.

8.2 Sensores

Los sensores de robot son los componentes de un sistema robótico encargado de recopilar información sobre su estado interno o las características del entorno externo; la conciencia sobre estos aspectos es fundamental para que el robot realice sus tareas.

Los sensores se pueden considerar como los sentidos del robot, ya que pueden proporcionar al robot diferentes tipos de información según los requisitos de la tarea. Para lograr este objetivo, se utilizan diferentes tipos de sensores para medir diferentes cantidades físicas. Cada vez que se adquiere la información del sensor, el sistema de control del robot la interpreta y actúa para ejecutar su tarea.

Los sensores se dividen en una de dos categorías:

- *Sensores internos*: que miden los valores físicos internos del sistema, como la posición, la velocidad, la aceleración, las fuerzas, los pares de torsión de las juntas del robot y la inercia de los enlaces del robot. Con base en estas mediciones, el sistema de control controla los actuadores de las juntas del robot para realizar el movimiento deseado de manera correcta y precisa.
- *Sensores externos*: que recopilan información sobre el entorno que rodea al robot, como distancias a los objetos, mediciones de luz y temperatura, y fuerzas encontradas cuando interactúa con el mundo.

La Figura 8.2-1 proporciona algunos ejemplos de cada una de estas categorías.

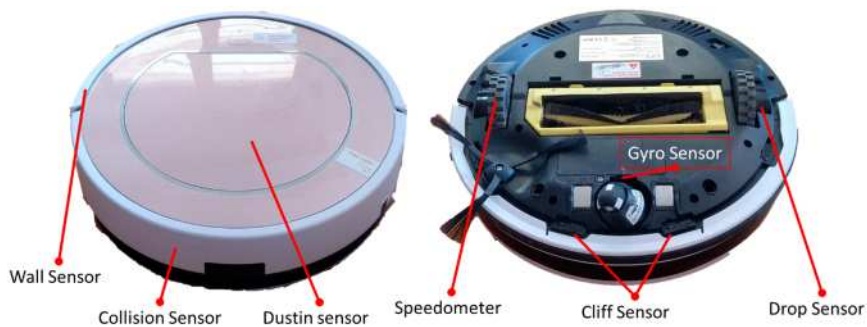


Figura 8.2-1 La vista superior e inferior de una aspiradora autónoma con sensores internos (sensor giroscópico, velocímetro, sensor de succión) y sensores externos (sensor de entrada de polvo, sensor de acantilado, receptor de sensor infrarrojo, sensor de pared, sensor de colisión, sensor de caída).

8.2.1 Principio de transducción del sensor

Cada sensor se basa en un *principio de transducción*; una conversión de energía de una forma a otra. Por lo general, los sensores se convierten en energía eléctrica para permitir que el robot lea una señal generada a partir de la medición de una cantidad física.

Aunque los sensores pueden basarse en más de un principio de transducción, una clasificación basada en los principios de transducción [1] puede ser útil para identificar los materiales, los costes y el tiempo de respuesta involucrados y, por lo tanto, para elegir el más adecuado para la aplicación.

- *Sensores basados mecánicamente*: Estos funcionan como simples interruptores; el contacto cierra el circuito dentro del sensor y se detecta la corriente. Al soltar el contacto se abre el circuito y no fluye corriente. Se puede establecer un umbral de fuerza mínimo como requisito para la conmutación.
- *Sensores basados en resistencia*: detectan cambios mecánicos al detectar cambios de resistencia del dispositivo. En su forma más simple consisten en dos electrodos separados por una capa de material deformable, cuya resistencia varía según la forma que asuma como reacción a un estímulo mecánico. El sensor resistivo más simple es el potenciómetro que mide la posición o el desplazamiento. Otros sensores resistivos incluyen medidores de tensión (para medir la fuerza / par, la tensión o la aceleración), termopares (para medir la temperatura), fotorresistores (para medir la intensidad de la luz) y termistores (para medir la temperatura).
- *Sensores de base capacitativa*: Estos son similares a los enfoques resistivos, donde el cambio de distancia entre placas o de un área de material debido a una entrada externa cambia la capacitancia del material. Muchos tipos de sensores utilizan sensores capacitivos, incluidos los sensores para detectar y medir la

proximidad, la presión, la posición y el desplazamiento, la fuerza, la humedad, el nivel de fluido y la aceleración.

- *Sensores ópticos*: Estos detectan un cambio en la intensidad, fase o polarización de la luz transmitida o reflejada y la convierten en una señal electrónica. No se ven afectados por interferencias electromagnéticas, son intrínsecamente seguros y requieren menos cables eléctricos. Se utilizan principalmente como sensores de posición, que se activan cuando un objeto interrumpe un haz de luz, como sensores fotoeléctricos que detectan la distancia, ausencia o presencia de un objeto, o sensores de cámara para adquirir una imagen.
- *Sensores basados en fibra óptica*: Estos utilizan fibras no sólo como transmisor de luz, sino como sensores, ya que cuando estas fibras se deforman debido a un estímulo externo, producen una variación en la intensidad, fase, polarización, longitud de onda o tiempo de tránsito de la luz transmitida. Las fibras ópticas se utilizan principalmente como sensores para medir la tensión, la temperatura y la presión.
- *Sensores Piezoeléctricos*: Estos se basan en la propiedad de los materiales piezoeléctricos, en que generan una diferencia de potencial eléctrico cuando se deforman, o viceversa (en este caso se utilizan como actuadores). Se utilizan para medir los cambios en la presión, la aceleración, la temperatura y la tensión.

8.2.2 Sensores de contacto

Los sensores externos se pueden clasificar como *sensores de contacto* y *sin contacto*, dependiendo de si el sensor necesita tocar físicamente el objeto para funcionar.

Los sensores de contacto se utilizan en gran medida para evitar obstáculos: cuando se produce un contacto físico entre el robot y el entorno externo, activa al robot para ejecutar una tarea, como un movimiento destinado a evitar el contacto.

Los *sensores de fuerza* pueden ser *cuantitativos* cuando detectan el valor de la fuerza, o pueden ser *cualitativos* cuando la salida muestra solo si la fuerza supera un valor umbral establecido.

Una aplicación común para estos sensores es la necesidad de evaluar las fuerzas o pares que aparecen durante la manipulación. Este objetivo se puede lograr midiendo directamente la fuerza / los pares en la muñeca del efector final (es decir, la junta que sostiene el efector final) o los sensores dentro de las juntas del robot.

En el primer caso (ver la Figura 8.22), las fuerzas y los pares se miden mediante el uso de sensores de fuerza de múltiples ejes, que consisten principalmente en estructuras mecánicas con elementos elásticos incorporados, cuya deformación se mide. Dado que el comportamiento estructural de estos elementos es bien conocido, la carga aplicada puede determinarse dependiendo de la deformación efectiva. La deformación se puede evaluar con diferentes enfoques, pero la más común se basa en la aplicación de *medidores de tensión*; componentes específicos cuya resistencia eléctrica cambia dependiendo de la deformación.

Algunos robots recientes equipan el sensor de fuerza en las articulaciones de la pinza o directamente las puntas de la pinza, con el fin de controlar la fuerza de agarre y calcular los puntos de contacto. Los sensores necesarios para alcanzar este

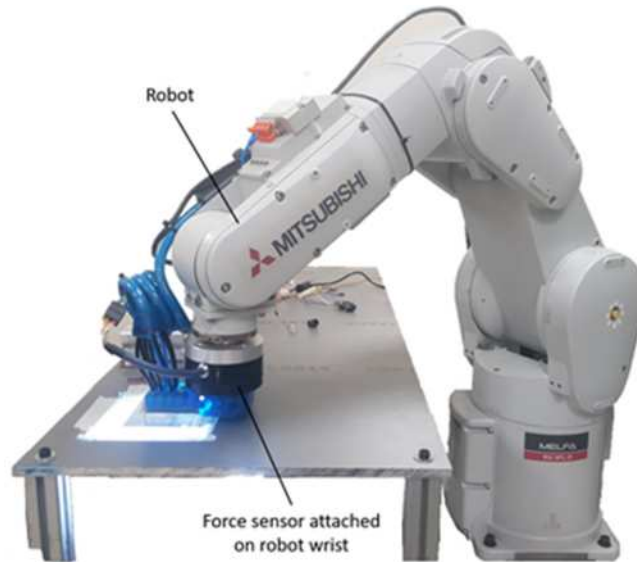


Figura 8.2-2 Robot antropomórfico con sensor de fuerza/par conectado en su muñeca.

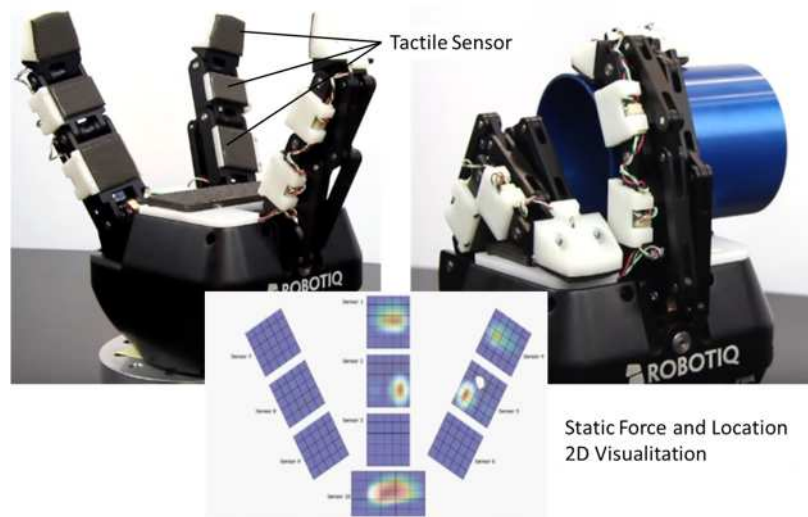


Figura 8.2-3 Sensor táctil en la pinza de robot industrial – Pinza de robot adaptativa de 3 dedos. El sensor de matriz es capaz de detectar la posición de la fuerza y la intensidad, como se muestra en la visualización 2F*.

* Fuente: www.robotiq.com

objetivo incluyen sensores de fuerza de un solo eje como medidores de tensión, sensores piezoeléctricos, sensores de presión o sensores de fuerza multieje como se presentó anteriormente para la muñeca del robot.

Los *sensores táctiles* consisten en matrices de sensores (y, por lo tanto, a veces se llaman sensores de matriz), cuyas señales se recogen individualmente para detectar el tipo de contacto físico análogo al sentido humano del tacto.

Se pueden definir como la detección continua de todos los diversos efectos originados por el contacto entre el robot (generalmente el efector final o las yemas de los dedos de la pinza) y un objeto. Los efectos basados en contacto más significativos son las tensiones y las fuerzas de contacto en las dos superficies de contacto. Los sensores táctiles son capaces de medir las fuerzas de contacto variables sobre un área con una resolución espacial específica.

Los sensores táctiles en los dedos de la pinza del robot permiten al robot detectar la presencia del objeto, la distribución de la presión, la forma del objeto, la textura de la superficie y la rugosidad, la posición del objeto (es decir, la posición y la orientación), y las ubicaciones de contacto, y cualquier información de deslizamiento.

Los sensores táctiles se utilizan en las yemas de los dedos de la pinza, como se ilustra en la Figura 8.2-4, pero se pueden montar en los enlaces del robot.

Los sensores táctiles típicamente utilizados en robótica son sensores de matriz que miden la presión de contacto mediante la deformación de una piel elástica / superposición. Un ejemplo de este tipo de sensor se muestra en la [2]. Este sensor consta de 16 celdas de detección de presión acopladas capacitivamente individuales para detectar la información táctil externa en una configuración de 4x4 [2]. Cada celda de detección de presión capacitiva está compuesta por un par de electrodos de detección CPDMS (Capacitive PolyDiMethylSiloxane) uno frente al otro a través de la capa aislante elastomérica (Ecoflex) para construir un condensador de placa paralela. La presión aplicada provoca el cambio local en la distancia entre los pares CPDMS (ya que la capa Ecoflex se deforma más fácilmente que el PDMS) y, por lo tanto, el consiguiente cambio de la capacitancia, que se puede detectar para obtener presión y la fuerza normal.

8.2.3 Sensores sin contacto

Los sensores sin contacto se utilizan para proporcionar al robot información sobre el entorno externo sin la necesidad de contacto físico.

Los *sensores de proximidad* detectan la presencia de objetos que están cerca de la superficie del sensor pero que no están en contacto. En robótica, estos sensores se utilizan para detectar posibles colisiones entre un brazo robótico y el medio ambiente. Esto podría ser deseable si se va a actuar sobre el objeto que se aproxima, o puede causar una colisión indeseable, por lo que se debe promulgar un plan de evitación o detener el robot.

Los *sensores de rango* son dispositivos que pueden proporcionar mediciones precisas de las distancias de objetos, generalmente midiendo el espacio entre el sensor y la superficie más cercana. Además, permiten el escaneo de la estructura tridimensional (3D) del entorno desde el punto de vista del sensor. En el campo de

la robótica, los sensores de rango son útiles para localizar objetos dentro del espacio de trabajo del robot y también como retroalimentación en un esquema de control de bucle cerrado [3]. Se utilizan para la navegación de robots, evitar obstáculos y reconstruir la tercera dimensión a partir de un sistema de visión 2D como una cámara.

Las técnicas de detección de rango pueden basarse en uno de dos principios: *triangulación* o *tiempo de vuelo* (time of flight).

El principio de funcionamiento de la *triangulación basada en láser* se ilustra en la Figura 8.2-6: un rayo láser se proyecta desde una posición sobre la superficie. El punto de luz (que puede ser también una franja de luz para adquirir simultáneamente más puntos) es observado por un sensor de visión desde una segunda posición. Con la información geométrica de las posiciones y orientaciones relativas de la fuente láser y el sensor, es posible calcular la posición 3D del punto de superficie iluminado o su distancia. Para capturar una imagen 3D, el sensor de triangulación basado en láser tiene que moverse en relación con el entorno, realizando un proceso de escaneo. Alternativamente, el punto láser se puede remodelar con lentes o espejos para crear múltiples puntos o rayas que permiten la medición de múltiples puntos 3D simultáneamente, sin movimiento.

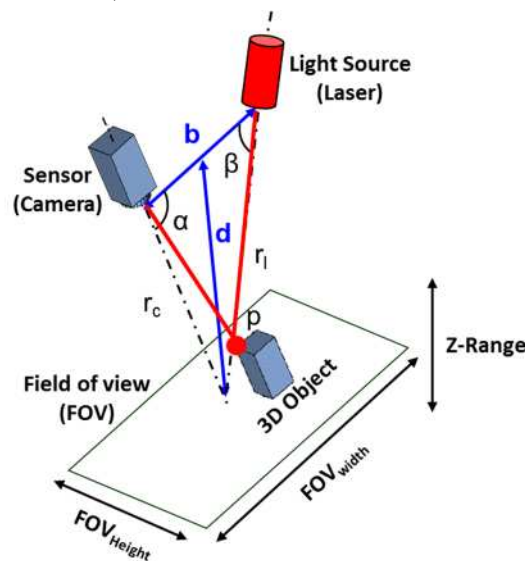


Figura 8.2-5 El principio físico de los sensores de triangulación: una fuente de láser emite una luz, generando un punto en una superficie 3D a medir y el sensor detecta el punto en su plano de imagen. Combinando esta información 2D con los parámetros geométricos del sistema, es posible calcular la posición 3D del punto proyectado en el entorno. Una colección de estos puntos (mediante el movimiento del sistema de triangulación) permite la reconstrucción de la superficie. Los parámetros fundamentales del sistema son la línea de base (b) y distancia (d). El primero es la distancia entre los centros ópticos de la cámara y el láser, y afecta al rango Z de medición, el segundo es la distancia desde la línea de base hasta el plano focal de la cámara, y afecta a la resolución Z.

Los sensores de rango de *tiempo de vuelo* calculan la distancia midiendo el tiempo de viaje de una señal (por ejemplo, luz) para cubrir la fuente de *ruta - objeto - detector*; el detector generalmente se encuentra cerca de la fuente. Los sensores de rango de sonar y basados en láser son los sensores de tiempo de vuelo más comunes. El primero puede considerarse un radar que se basa en la emisión y detección de luz. Un sonar emplea pulsos acústicos y sus ecos para medir la distancia de un objeto y también su posición 3D. Como se conoce la velocidad de la luz y el sonido, es posible obtener la distancia desde el tiempo de retardo.

Los sistemas de visión también permiten recopilar información sobre el medio ambiente sin contacto con el entorno. La adquisición de datos basados en la visión por computadora es un proceso de detección complejo que consiste en la extracción, caracterización e interpretación de la información proporcionada por las imágenes con el fin de identificar objetos en el entorno. Un sistema de visión consiste en una o una serie de lentes, asociados con un sensor de visión que convierte la información visual en señales eléctricas. Estas señales son luego analizadas por un digitalizador de imagen, llamado capturador de cuadros, para obtener una imagen digital.

8.3 Actuadores

En el cuerpo humano, los movimientos se generan en la corteza motora primaria del cerebro, se traducen y se transfieren a los músculos, que son capaces de transformar la energía disponible en movimiento mecánico (ver la Figura 8.3-1). El músculo aparece como el principal contribuyente al proceso, el "*motor*" que permite la ocurrencia del movimiento.

Pero... ¿cuál es el músculo de un robot?

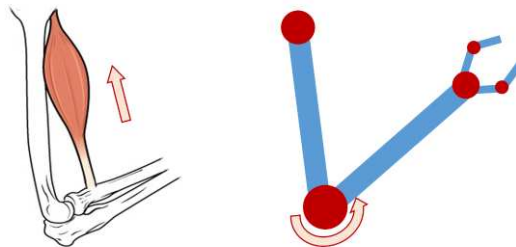


Figura 8.3-1 Músculos humanos* vs actuadores de robot.

Derechos de imagen: OpenStax.

* https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1015_Types_of_Contraction_new.jpg (informado parcialmente), [Enlace a la licencia](#)

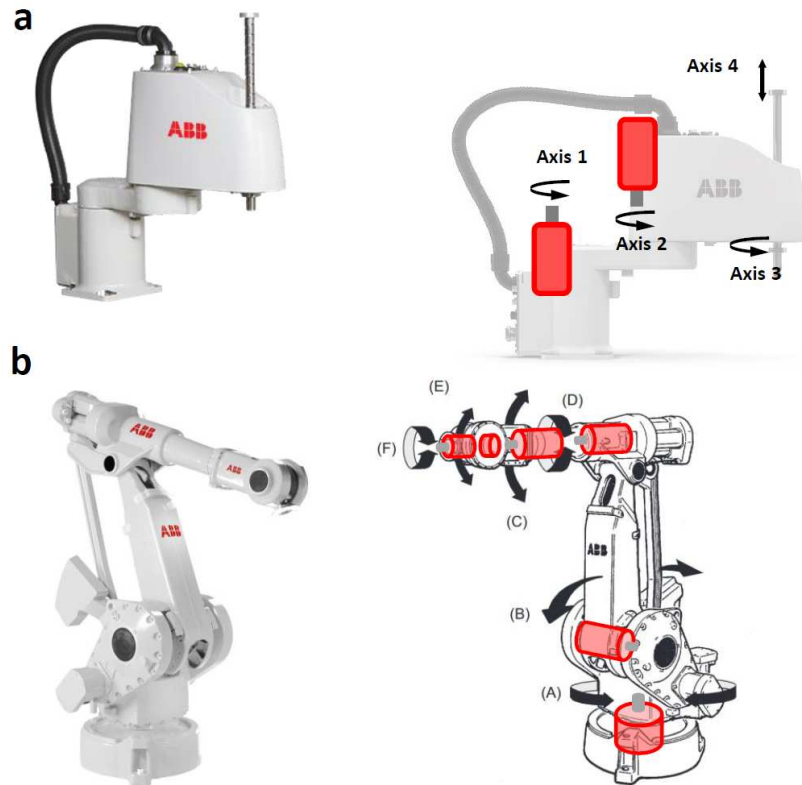


Figura 8.3-2 Los cuatro ejes del ABB IRB 910SC (4 ejes) VS los seis ejes del ABB IRB 4400 (6 ejes) con las posiciones de algunos actuadores resaltadas en rojo*. Derechos de imagen: ABB.

En los robots, este papel lo desempeñan los *actuadores*, que son los componentes responsables del movimiento de los enlaces, de acuerdo con las trayectorias deseadas. Un actuador convierte una forma primaria y disponible de energía en energía mecánica para operar el robot.

Un robot capaz de mover el efector final en cualquier configuración (limitado por su propio volumen de trabajo) está equipado con al menos 6 actuadores, cada uno responsable del movimiento a lo largo / alrededor de un solo eje. Un ejemplo es el robot que se muestra en la Figura 8.3-2.

Un actuador debe tener el tamaño adecuado para soportar cargas e inercias, así como para cumplir con los requisitos de rendimiento: el modelado dinámico de los robots permite una evaluación precisa del rendimiento requerido para cada actuador

* <https://new.abb.com/products/robotics/robots-industriales>

individual, que puede representarse principalmente como la potencia que puede ejercer.

La *potencia* es un parámetro adecuado para comparar diferentes formas de energía: como ya se explicó, los actuadores convierten la potencia, proporcionada como una determinada fuente, proporcionando energía mecánica a enlaces y juntas. Incluso si la potencia efectiva es el parámetro adecuado para identificar el tamaño de un actuador, no es suficiente para la definición completa de una unidad de accionamiento. Hay, de hecho, otras características que caracterizan el rendimiento requerido para mover correctamente una arquitectura mecánica, que especifican con precisión la unidad de accionamiento más adecuada.

8.3.1 Tipo de movimiento

Una primera clasificación de los actuadores se puede definir sobre la base del *tipo de movimiento* generado por la acción del actuador:

- *Actuadores lineales*: Proporcionar movimiento a lo largo de una dirección recta y su propia geometría limita la carrera; un ejemplo fuera del mundo robótico está representado por actuadores hidráulicos de máquinas de servicio pesado (Figura 8.3-3a).
- *Actuadores rotativos*: Puede girar, generalmente abarcando 360° y realizando más rondas; los límites de posición son impuestos por la arquitectura robótica. Con las diferencias apropiadas, un ejemplo en nuestra experiencia diaria está representado por el motor que conduce una lavadora (Figura 8.3-3b).

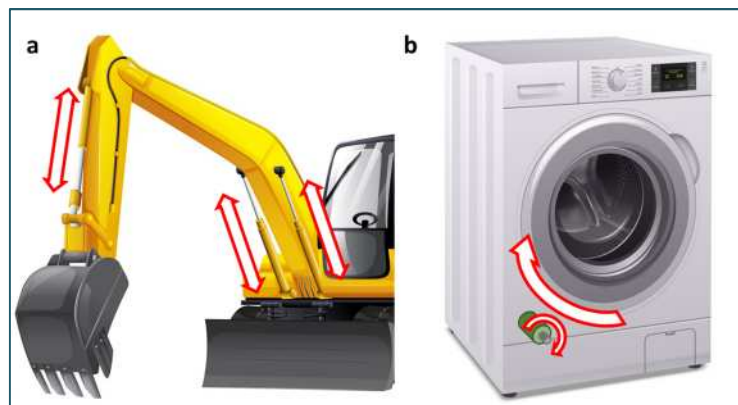


Figura 8.3-3 Ejemplos de actuadores en otros campos de aplicación: a) cilindros hidráulicos de máquinas de revisión (lineales) y b) el motor eléctrico de una lavadora (rotativa).

Teniendo en cuenta el concepto de potencia mecánica, resulta como la combinación de *fuerza* y *velocidad*. Esto es válido para todos los sistemas mecánicos, independientemente del tipo de movimiento. En los actuadores lineales,

esto se expresa como $P = F \cdot V$, mientras que en los actuadores rotativos $P = T \cdot \omega$, con *par* (T) que representa una forma de “fuerza de rotación”, y ω la velocidad angular. Se deduce que una especificación más detallada para el rendimiento del actuador define no solo la potencia, sino también la fuerza máxima (o par) y la velocidad (lineal o angular). Debido a esto, generalmente se instalan engranajes de reducción de velocidad específicos en un robot aguas abajo de un actuador para modular adecuadamente la fuerza y la velocidad y cumplir con los requisitos de la implementación particular.

Los robots industriales a veces tienen arquitecturas complejas, que se definen teniendo en cuenta características dinámicas como la destreza en ciertas zonas de la envolvente de trabajo y la distribución de carga / inercia. Debido a esto, los actuadores, que pueden ser pesados y voluminosos, a menudo no se pueden instalar en la proximidad directa de las juntas a controlar. Surge la necesidad de sistemas capaces de transferir la potencia de los actuadores a las juntas, lo que lleva a la implementación de diferentes estrategias de transmisión de movimiento, basadas en correas, engranajes y / u otros sistemas mecánicos. Según estas consideraciones, una unidad de accionamiento general puede definirse como compuesta por un actuador (la unidad de motor), engranajes de reducción y una transmisión mecánica, tal como se representa en Figura 8.3-4.



Figura 8.3-4 Ejemplos de motor eléctrico robot, engranaje planetario y transmisión de correa*. Derechos de imagen: Dr. Arun Dayal Udai.

8.3.2 Fuente de alimentación

Una segunda clasificación fundamental de los actuadores se basa en la fuente de energía explotada para generar movimiento mecánico:

- *Actuadores eléctricos:* Estos representan la opción más común para los robots industriales y se basan principalmente en corriente continua (DC), aunque existen versiones basadas en corriente alterna (AC). Los más populares son los actuadores rotativos, pero también existen modelos lineales. Los actuadores eléctricos (o motores eléctricos) se caracterizan por una alta compacidad y fiabilidad. Debido a esto, y teniendo en cuenta la disponibilidad de electricidad

* <https://www.youtube.com/watch?v=iRKDfknqtbc> (Propiedad del Dr. Arun Dayal Udai, arun_udai@yahoo.com)

en todas las plantas, en realidad son la forma más extendida de actuador en la industria de la robótica. Los actuadores eléctricos generan velocidades extremadamente altas y, como resultado, siempre están acoplados con engranajes reductores específicos.

- *Actuadores hidráulicos*: Estos utilizan aceite como fluido incompresible, los actuadores hidráulicos generalmente proporcionan movimiento lineal, aunque hay modelos rotativos disponibles. Son muy potentes, pero requieren mantenimiento y circuitos dedicados para la circulación de aceite. Su implementación en robots también está muy extendida, especialmente en diseños "patas".
- *Actuadores neumáticos*: representan la versión neumática de los actuadores hidráulicos. El uso de aire presurizado no garantiza una rigidez suficiente con cargas útiles elevadas; sin embargo, los actuadores neumáticos permiten realizar una serie de tareas de fabricación, que se realizan con extrema simplicidad (empujar, tirar, levantar, colocar, apretar, mezclar, cortar, perforar, etc.), incluso si no es posible un control de precisión extrema. En su mayoría son lineales, se implementan en trayectorias de parada a parada, como ciertas tareas de selección y colocación.

Las principales ventajas y desventajas de las diferentes fuentes de alimentación del actuador se presentan esquemáticamente en la Figura 8.3-5.

Fuentes de alimentación	Principales ventajas	Principales desventajas
Actuadores eléctricos	<p>Velocidad y precisión</p> <p>Fácil control y, por lo tanto, posibles algoritmos de control complejos</p> <p>Bajo costo</p> <p>Dimensiones y peso reducidos</p>	<p>Los engranajes de reducción son una fuente de pérdidas mecánicas e imprecisiones</p> <p>Poder disponible limitado</p>
Actuadores hidráulicos	<p>Alto rendimiento (fuerza/velocidad)</p> <p>Backdrivability intrínseco: no requiere energía para mantener una pose</p>	<p>Relación costo / rendimiento desventajosa</p> <p>Ruido y fugas</p> <p>Sobre voluminoso</p>
Actuadores neumáticos	<p>Bajo costo</p> <p>Alta velocidad</p> <p>Ninguna toxicidad en caso de salida</p>	<p>Precisión limitada (debido a las características del fluido)</p> <p>Ruido (menos que hidráulico)</p> <p>Necesidad de filtros de aire y mantenimiento</p>

Figura 8.3-5 Principales ventajas y desventajas de los actuadores más comunes.

Aunque los actuadores enumerados anteriormente representan los principales actuadores utilizados en robótica industrial, hay algunos otros actuadores que explotan principios físicos particulares y vale la pena mencionar.

Los actuadores *piezoeléctricos* utilizan ciertos materiales cristalinos, como el cuarzo, que modifican su configuración y se deforman físicamente cuando se aplica una tensión al material (ver Figure 8.3-6). Esta deformación, proporcional al campo eléctrico, es muy pequeña pero también muy precisa, lo que permite un posicionamiento en el orden de μm . De ello se deduce que su aplicación se puede prever en el ensamblaje de productos a microescala. Vale la pena señalar que su principio de funcionamiento es reversible y se pueden utilizar como sensores de posicionamiento midiendo la tensión inducida.

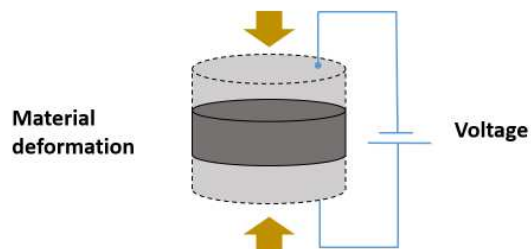


Figura 8.3-6 Principio de funcionamiento de un actuador piezoeléctrico.

Las *aleaciones de memoria de forma (SMA)* son aleaciones metálicas que pueden "recordar" su posición original. Para restaurar su configuración inicial, es suficiente calentar el material aplicando una corriente eléctrica (efecto Joule). Las fuerzas generadas son considerables. Actualmente, su implementación como actuadores sigue siendo experimental y se está investigando en varios campos que tienen exigentes requisitos geométricos, debido a su gran ventaja de poder ejercer una fuerza sin la necesidad de actuadores voluminosos.

8.4 Microrobótica

Los logros de la miniaturización son cada vez más evidentes en la vida cotidiana; los dispositivos miniaturizados están presentes en un número creciente de aplicaciones, especialmente dispositivos electrónicos, como teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, sensores de vehículos y artículos domésticos, pero también sondas biológicas, sistemas médicos y dispositivos militares. En robótica, esta tendencia conduce a soluciones innovadoras en una gran variedad de campos de aplicación, como el mantenimiento e inspección en la industria, la cirugía no invasiva en medicina y la microoperación en biología. Debido a sus dimensiones reducidas, los robots miniaturizados pueden realizar tareas que se encuentran en espacios pequeños que no son accesibles para los humanos. La microrobótica sigue siendo un tema de investigación muy prometedor a pesar de que ya se han

desarrollado varios prototipos de investigación [4][5][6][7]. La microrobótica a menudo se menciona como parte de la cartera de tecnología de la Industria 4.0, que incluye también sensores, drones, realidad virtual y aumentada, fabricación aditiva, que puede abordar los desafíos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, establecidos por las Naciones Unidas [8].

En la literatura, el término *microrobot* se refiere a una gran variedad de dispositivos robóticos. Generalmente se aplica a *todo tipo de robots que realizan tareas en el micromundo*.

Sin embargo, el término microrobots se usa más correctamente para robots en *miniatura cuyo tamaño es del orden de unos pocos centímetros cúbicos*. La razón detrás de esta amplia definición del término es que ambas categorías comparten algunos de los principales desafíos: física no intuitiva, fabricación difícil y observación.

Al igual que los robots convencionales, los microrobots son sistemas integrados que consisten en sensores, actuadores y un circuito lógico. El aspecto más desafiante en el desarrollo de microrobots es la fabricación de microactuadores y microsensores que pueden dar alta eficiencia y alta estabilidad. Los sensores que se pueden usar en espacios pequeños a menudo no son muy precisos, por lo que el conocimiento del entorno no es completo y el sistema de control tiene que hacer frente a esto. Además, los *microcontroladores* generalmente no tienen la potencia de procesamiento y la memoria comunes en la macroescala. Por lo tanto, los métodos de control simplificados generalmente se prefieren en la microescala. Los mecánicos son intrínsecamente más robustos a pequeña escala [9]; esto es una ventaja para los microrobots donde se puede ahorrar espacio para componentes más críticos.

El ensamblaje de componentes tan pequeños es otro tema relevante para los microrobots. Los efectos de escala y el consiguiente predominio de fuerzas superficiales afectan el funcionamiento de un micromanipulador [10]. En particular, la fase de liberación de una manipulación es crítica y se han investigado y probado varias estrategias. En cuanto a la microfabricación, cada método tiene ventajas y desventajas que hacen que un método sea más adecuado en algunas aplicaciones que en otras.

Todos estos problemas hicieron que no solo la fabricación, sino también el diseño de microrobots fuera muy complicado. Existe una fuerte dependencia entre el control y el modelo y todo el sistema, las partes cibernéticas y físicas deben concebirse al mismo tiempo y cualquier cambio en una de ellas se refleja en un rediseño de la otra. Esto hace de los microrobots, complicados sistemas cibernéticos, más profundamente discutido en el próximo capítulo.

8.4.1 Energía

Uno de los principales problemas relacionados con la miniaturización de los robots es la energía; debido a la reducción de tamaño se reduce el espacio para la fuente de energía y, además, aumentan las corrientes de fuga. Por lo tanto, la minimización del consumo de energía es esencial; la tensión de funcionamiento

debe ser lo más baja posible y la energía requerida por todos los componentes minimizada.

Las soluciones más utilizadas son baterías y supercondensadores. Las baterías son adecuadas en términos de potencia y durabilidad, pero son difíciles de miniaturizar. Los supercondensadores tienen límites más bajos del voltaje y ofrecen una densidad de energía más baja, pero corrientes más altas para cargar y descargar. Además, los supercondensadores se pueden recargar, lo que permite combinarlos con generadores de energía, como las células solares. De hecho, las fuentes de energía inalámbricas, como la radiofrecuencia, la potencia óptica y la recolección de energía son adecuadas y, a menudo, ventajosas debido a la miniaturización.

8.4.2 Control

El controlador de un robot tiene que procesar información y generar acciones adecuadas. Los dispositivos más pequeños tienden a tratar con entornos menos complejos y más restringidos y hacer movimientos más pequeños y más lentos, por lo que podrían requerir un sistema de control más simple y no tan rápido. Sin embargo, debido a las dimensiones muy pequeñas de los microrobots, los procesadores a bordo con suficiente potencia de cálculo siguen siendo un desafío.

8.4.3 Sensor

Para realizar su tarea, un robot debe estar equipado con tantos sensores como sea necesario para percibir el entorno circundante. Los robots móviles tienen que ser capaces de detectar obstáculos a una distancia lo suficientemente grande para que puedan evitarse; por lo tanto, los sensores táctiles, los sensores de distancia y / o sensores de proximidad son.

Los sensores para microrobots deben reducirse en tamaño y minimizarse su consumo de energía, lo que puede ser un problema importante. Por lo tanto, los sensores pasivos, que no suministran energía al medio ambiente, o los sensores activos muy simples son los sensores más adecuados para microrobots. Las cámaras y los micrófonos son, por lo tanto, muy comunes como sensores pasivos en microrobots, junto con medidores de tensión que pueden reducirse fácilmente. Los sensores de proximidad infrarrojos activos, que son fáciles de usar, económicos y se pueden encontrar en paquetes compactos, también son muy adecuados.

8.4.4 Actuadores

Los actuadores son uno de los principales problemas en el diseño de robots en miniatura. La elección de los principios de actuación para el diseño de un microrobot debe llegar a un compromiso en el rango de movimiento, fuerza, frecuencia de actuación, consumo de energía, precisión de control, fiabilidad del sistema, robustez, capacidad de carga, etc.

La Figura 8.4-1 enumera los tipos más comunes de actuación y sus principales características. Cada solución ofrece ventajas y desventajas, pero ninguna se adapta perfectamente a todas las aplicaciones.

Principio de conducción	Actuador	Campo de conducción	Rendimiento	Velocidad de respuesta	Conducción de voltaje
Electricidad estática	Motor rotatorio electrostático	Grande	Pequeño	Medio	Alto
	Electrostática lineal	Pequeño	Medio	Alto	Alto
Electro inducción magnética	Motor ordinario	Grande	Pequeño - Mediano	Medio - Alto	Bajo
Piezo electricidad	Bimorph	Pequeño	Medio - Alto	Alto	Alto
Calor	Aleación de la memoria de la forma	Grande	Grande	Bajo - Medio	Bajo

Figura 8.4-1 Características típicas de los tipos de actuador más comunes [11].

La electrostática, la electromagnética y la piezoeléctrica son las soluciones más comúnmente utilizadas para el accionamiento a pequeña escala.

Los campos electrostáticos y electromagnéticos se pueden crear e interrumpir rápidamente, lo que permite una actuación muy rápida. Además, los campos electrostáticos pueden ejercer grandes fuerzas, pero en una distancia muy corta, a menos que se use alto voltaje. El consumo de corriente extremadamente bajo asociado con los dispositivos electrostáticos hace que la actuación sea altamente eficiente. Los campos electromagnéticos ofrecen la ventaja de convertir la energía eléctrica en trabajos mecánicos con alta eficiencia, lo que conduce a un bajo consumo de corriente. La principal desventaja es la mala escalabilidad de los imanes eléctricos.

Los materiales piezoeléctricos (titanato de circonato, PZT, cuarzo, SiO₂, niobita de litio) también son muy comunes. Sus cristales moleculares muestran un cambio dimensional cuando están en un campo eléctrico y, viceversa, producen un voltaje cuando se deforman. Muestran una respuesta muy rápida a la entrada, gran repetibilidad y alta fuerza, pero exhiben golpes muy pequeños (menos del 1%). Por lo tanto, generalmente se combinan en pilas o en modos stick-slip para obtener golpes más grandes.

Otros materiales inteligentes también se vuelven ventajosos en la microescala [12]. Las aleaciones de memoria de forma (SMA) son materiales funcionales que tienen dos fases cristalógraficas sólidas estables. Pueden transformarse reversiblemente de una estructura cristalina a la otra estructura al calentarse y generar trabajo mecánico durante la transformación de fase. Ofrecen gran desplazamiento y fuerza de actuación dentro de un volumen extremadamente pequeño y una baja tensión de funcionamiento. Algunos problemas, como la baja

respuesta de tiempo dinámico y la histéresis grande, limitan su uso en la macroescala, pero estos problemas son menos relevantes en la microescala.

Los polímeros electroactivos (EAP) son materiales muy prometedores. Se puede lograr una deformación muy grande (10% - 400%) cuando se aplica un voltaje a través de la película polimérica, recubierta con electrodos en ambos lados. Son livianos, económicos, tolerantes a las fracturas y rápidos, pero generalmente requieren un alto voltaje de CC ($> 150\text{V} / \mu\text{m}$), que también está muy cerca del voltaje de ruptura del material. Además, sus aplicaciones están limitadas por las bajas fuerzas de actuación.

8.5 Conclusiones

Los sensores y actuadores son los principales componentes de los robots y están bajo continuo desarrollo con el fin de mejorar su rendimiento y hacer frente a nuevos desafíos. Nuevos avances se requieren en el contexto de la Industria 4.0 para construir fábricas inteligentes, donde todos los dispositivos están integrados en un sistema de red y toda la cadena de producción está automatizada. En las fábricas inteligentes, los sensores inteligentes sirven como la interfaz entre el mundo digital y el físico. Consisten en la combinación de un sensor, un microprocesador y un sistema de comunicación para que los datos ambientales sean monitorizados y transmitidos, en tiempo real, al sistema de control principal. Estos datos se utilizan para activar los actuadores con el fin de gestionar automáticamente el proceso y el mantenimiento, mejorando la eficiencia y la calidad de la fabricación. Una gran cantidad de datos son recopilados para supervisar los procesos de producción, el entorno y sus modificaciones. Esto mejora la salud y la seguridad en el espacio de trabajo, en particular cuando la cooperación entre robots y humanos se produce.

Términos de acceso (Open Access) Este capítulo se distribuye bajo los términos de la Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso, duplicación, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre que dé el crédito apropiado al autor o autores originales y la fuente, se menciona y proporciona un enlace a la licencia Creative Commons y se indica cualquier cambio realizado.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del trabajo, a menos que se indique lo contrario en la línea de crédito de cada material; Si dicho material no está incluido en la licencia Creative Commons de la obra y la acción respectiva no está permitida por la normativa legal, los usuarios deberán obtener permiso del titular de la licencia para duplicar, adaptar o reproducir dicho material

8.6 Referencias

- [1] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, III Edition, Springer International Publishing, 2016
- [2] S-J. Woo et al., "Thin All-Elastomeric Capacitive Pressure Sensor Array Based on Micro Contact Printed Elastic Conductors", *Journal of Materials Chemistry C* vol2, pp. 4415-4422, 2014
- [3] R. B. Fisher et al., *Range Sensors*, Springer Handbook of Robotics, II Edition, Ed. Siciliano et Khatib, Springer Berlin Heidelberg, pp 455-476, 2016.
- [4] G. Caprari, T. Estier y R. Siegwart, "ascination of down scaling- alice the sugar cube robot", *Journal of Micro-Mechatronics*, vol. 1,no. 3, pp 177-189, 2002.
- [5] S. Kernbach, R. Thenius, O. Kernbach, and T. Schmickl, "Re-embodiment of Honeybee Aggregation Behavior in an Artificial Micro-Robotic System," *Adaptive Behavior*, vol. 17, no. 3, pp. 237–259, 2009.
- [6] F. Mondada, M. Bonani, X. Raemy, J. Pugh, C. Cianci, A. Klaptocz, S. Magnenat, J.-C. Zufferey, D. Floreano y A. Martinoli, " The e- puck, a robot designed for education in engineering," in *Proceedings of the 9th conference on autonomous robot systems and competitions*, vol. 1, no. 1, pp. 59–65, 2009.
- [7] M. Rubenstein, C. Ahler y R. Nagpal, "Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3293–3298, 2012.
- [8] Nayyar A., Kumar A., editors. *A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development*. Springer; p. 1-21, 2020
- [9] Zhu, TT, Bushby, A.J. and Dunstan, D.J., "Materials mechanical size effects: a review", *Materials Technology*, 23(4), p. 193-209, 2008.
- [10] Ghosh, Un, 2011. "Scaling laws", in *Mechanics over micro and nano scales*, p. 61-94. Nueva York, Nueva York.
- [11] P. Dario et al., "Microactuators for microrobots: a critical survey", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2(3), pp. 141-57, 1992.
- [12] C. Pagano, I. Fassi, "Introduction to miniaturisation in Micro-manufacturing technologies and their applications", in I. Fassi, D. Shipley, editors. *Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications*. Springer Cham; p. 1-22, 2017



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



"El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido que refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en el mismo"

Sistema de formación en fabricación Digital para Pymes (Digit-T)
Referencia del proyecto: 2017-1-UK01-KA202-036807