

SENSORES Y ACTUADORES PARA ROBOT



Introducción

Desde hace décadas los robots se han insertado en diferentes ámbitos de nuestra cultura y sociedad. Los hemos visto en el cine, en épicas películas de robots como Terminator, Yo Robot y por supuesto Transformers, que junto a Mazinger Z fueron aquellos legendarios dibujos animados de robots japoneses que nos acompañaron en la infancia. El pasado era ficción, y en el presente, **nos encontramos rodeados de diferentes tipos de robots que nos ofrecen un futuro apasionante.**

La implantación de robots en prácticamente todos los ámbitos de la sociedad está avanzando vertiginosamente. **Un selecto grupo de países lideran la instalación de robots a nivel mundial**, y son Estados Unidos, China, Japón, Corea del Sur y Alemania.

Su principal objetivo es **abaratarse los costes de producción**, y aunque hasta hace pocos años, únicamente los veíamos en el sector industrial automatizando puestos de trabajo, ahora también disfrutamos de los robots en hoteles, bares, bancos, consultas médicas, ejerciendo de policías o en catástrofes naturales.

Podemos definir el significado de la **robótica** como **una ciencia que aglutina varias ramas tecnológicas** o disciplinas, con el objetivo de diseñar máquinas robotizadas que sean capaces de realizar tareas automatizadas o de simular el comportamiento humano o animal, en función de la capacidad de su software.

El **robot** lo podemos definir como una entidad autómatas compuesta por mecánica artificial y un sistema electromecánico de **sensores y actuadores**. Ha sido creado a partir de la investigación de la ciencia y la tecnología. Un robot se diferencia de un **bot** en que está compuesto de mecanismos físicos y tangibles, mientras que el **bot** se encuentra alojado en un software dentro de un sistema virtual ubicado en la Nube (Cloud).

Los últimos avances en ingeniería robótica han logrado que se puedan implementar en cualquier puesto de trabajo. Son especialmente interesantes para abaratar los costes de producción, pero además también permiten ser empleados en lugares de riesgo o que generen sobrecargas musculares a los operarios, lo que reduce las bajas laborales y la siniestralidad.

Otra característica de los robots es que trabajan con una precisión que no se ve alterada por el cansancio, el sueño, turnos de trabajo o enfermedades, pero es que además no necesitan vacaciones ni “de momento” hay que pagar impuestos por ellos.

Si bien es cierto que los robots industriales pueden trabajar 24/7, al igual que sucede con un operario, los robots necesitan que se les haga un mantenimiento preventivo y paliativo.

El mayor inconveniente de la implantación de dispositivos robotizados a los puestos de trabajo es que va seguir causando en la próxima década una destrucción de empleo masiva, principalmente en el sector industrial y servicios. Sin duda es una realidad difícil de ocultar, aunque es igual de evidente que se van a generar millones de nuevos puestos de trabajo en torno a la robótica.

Existen diferentes familias de robots, así como las formas de clasificarlos, y en este caso los vamos a dividir por su funcionalidad:

- **Robot industrial.** Poseen brazos mecánicos o poliarticulados con diferentes ejes, los cuales pueden ser móviles o fijos.
- **Robot de servicios.** Son los robots sociales y pueden ser del tipo humanoide, zoomorfos o zoomórficos y móviles. Están destinados a sectores como la salud, el ocio o la defensa militar entre otros.
- **Nanorobótica.** Son los robots que, por sus reducidas dimensiones, han sido creados para realizar funciones científicas.



En este documento nos centraremos principalmente en los elementos **sensores** que son los que captan una determinada señal física o eléctrica y los **actuadores** que son el sistema de accionamiento para mover determinados componentes. Por ejemplo, los sensores de posicionamiento son los que captan e informan al sistema de una determinada posición programada para que posteriormente el sistema accione y haga funcionar un **actuador**, que mueva un brazo robot por medio de un motor.

LOS SENSORES PARA ROBOT

Los sensores para robots móviles son los dispositivos que le permiten al robot percibir e interactuar con el entorno físico que le rodea y reaccionar de manera eficaz y segura.

Los sensores son herramientas que detectan y responden a algún tipo de información del entorno físico. Existe una amplia gama de sensores utilizados en la vida diaria, que se clasifican según las cantidades y características que detectan.

En la robótica existen 2 tipos de sensores:

1. Sensores internos
2. Sensores externos

Para conseguir que un robot realice su tarea con la adecuada precisión, velocidad e inteligencia, será preciso que tenga conocimiento tanto de su propio estado como del estado de su entorno. La información relacionada con su estado (fundamentalmente la posición de sus articulaciones) la consigue con los denominados **sensores internos**, mientras que la que se refiere al estado de su entorno, se adquiere con los **sensores externos**.

Sensores internos

Entre los sensores internos se encuentran estos diferentes tipos:

- de posición
- de velocidad
- de presencia

Tipos de sensores internos de robots		
Posición	Analógicos	Potenciómetros <i>Resolver</i> Sincro <i>Inductosyn</i> LVDT
	Digitales	<i>Encoders</i> absolutos <i>Encoders</i> incrementales Regla óptica
Velocidad		Taco-generatriz
Presencia		Inductivo Capacitivo Efecto Hhall Célula Reed Óptico Ultrasonidos Contacto

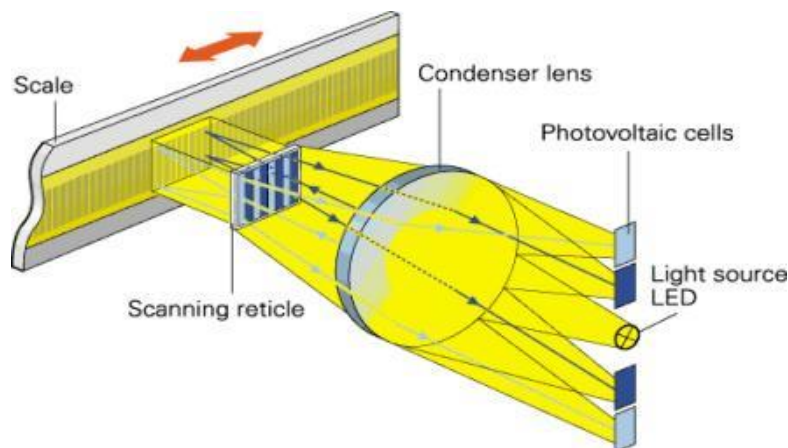
- **Sensores de posición**

Para el control de posición angular se emplean fundamentalmente los denominados *encoders* y *resolvers*. Los potenciómetros dan bajas prestaciones por lo que no se emplean salvo en contadas ocasiones (robots educacionales, ejes de poca importancia).

- ❖ **Codificadores angulares de posición (encoders)**

Los codificadores ópticos o **encoders incrementales** constan, en su forma más simple, de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí, de un sistema de iluminación en el que la luz es colimada de forma adecuada, y de un elemento **fotorreceptor**. El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco transparente. Con esta disposición, a medida que el eje gire se irán generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atravesase cada marca, y llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

Existe, sin embargo, el problema del desconocimiento en un momento dado de si se está realizando un giro en un sentido o en el opuesto, con el peligro que supone no estar contando adecuadamente. Una solución a este problema consiste en disponer de otra franja de marcas, desplazada de la anterior de manera que el tren de pulsos que con ella se genere esté desplazado 90° eléctricos con respecto al generado por la primera franja. De esta manera, con un circuito relativamente sencillo, es posible obtener una señal adicional que indique cuál es el sentido de giro y que actúe sobre el contador correspondiente indicándole que incremente o reduzca la cuenta que se está realizando. Es necesario además disponer de una marca de referencia sobre el disco que indique que se ha dado una vuelta completa y que, por tanto, se ha de empezar la cuenta de nuevo. Esta marca sirve también para poder comenzar a contar tras recuperarse de una caída de tensión.



Esquema de funcionamiento del codificador angular de posición *encoder*

La resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco. Un método relativamente sencillo para aumentar esta resolución es, no solamente contabilizar los flancos de subida de los trenes de pulsos, sino contabilizar también los de bajada, incrementando así la resolución del captador, pudiéndose llegar, con ayuda de circuitos adicionales, hasta 100.000 pulsos por vuelta.

El funcionamiento básico de los codificadores o **encoders absolutos** es similar al de los incrementales. Se tiene una fuente de luz con las lentes de adaptación correspondientes, un disco graduado y unos fotorreceptores. En este caso, el disco transparente se divide en un número determinado de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos según un código binario cíclico (normalmente código de Gray) que queda representado por zonas transparentes y opacas dispuestas radialmente. No es necesario ahora ningún

contador o electrónica adicional para detectar el sentido del giro, pues cada posición (sector) es codificado de forma absoluta. Su resolución es fija, y vendrá dada por el número de anillos que posea el disco graduado. Las resoluciones habituales van desde 2^8 a 2^{19} bits (desde 256 a 524288 posiciones distintas).

Normalmente los sensores de posición se acoplan al eje del motor. Considerando que en la mayor parte de los casos entre el eje del motor y el de la articulación se sitúa un reductor de relación N, cada movimiento de la articulación se verá multiplicado por N al ser medido por el sensor. Éste aumentará así su resolución, multiplicándola por N.

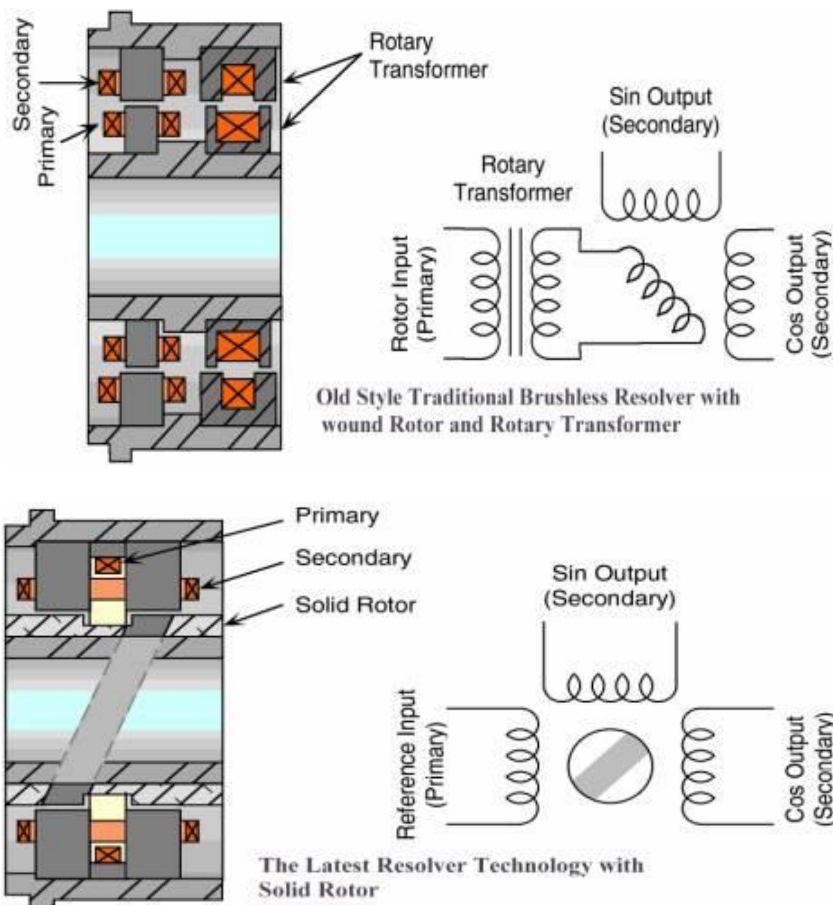
En algunos *encoders* absolutos se utiliza otro **encoder absoluto** más pequeño conectado por un engranaje reductor al principal, de manera que cuando éste gire una vuelta completa, el codificado adicional avanzará una posición. Son los denominados **encoder absolutos multivuelta**.

Esta misma circunstancia originará que en el caso de los codificadores incrementales la señal de referencia o marca de cero, sea insuficiente para detectar el punto origen para la cuenta de pulsos, pues habrá N posibles puntos de referencia para un giro completo de la articulación. Para distinguir cuál de ellos es el correcto se suele utilizar un detector de presencia denominado sincronismo, acoplado directamente al eslabón del robot que se considere. Cuando se conecta el robot desde una situación de apagado, es preciso, ejecutar un procedimiento de búsqueda de referencias para los sensores (sincronizado). Durante su ejecución se leen los detectores de sincronismo que detectan la presencia o ausencia de eslabón del robot. Cuando se detecta la presencia o ausencia de pieza, o viceversa, se atiende al **encoder incremental**, tomándose como posición de origen la correspondiente al primer pulso de marca de cero que aquél genere.

Los **encoders** pueden presentar problemas mecánicos debido a la gran precisión que se debe tener en su fabricación. La contaminación ambiental puede ser una fuente de interferencias en la transmisión óptica. Son dispositivos particularmente sensibles a golpes y vibraciones, estando su margen de temperatura de trabajo limitado por la presencia de componentes electrónicos.

❖ **Captadores angulares de posición (sincro-resolvers).**

La otra alternativa en sensores de posición para robots la representan los **resolvers** y los **sincroresolvers**, también llamados **sincros**. Se trata de sensores analógicos con resolución teóricamente infinita. El funcionamiento de los *resolvers* se basa en la utilización de una bobina solidaria al eje excitada por una portadora, generalmente con 400Hz, y por dos bobinas fijas situadas a su alrededor.



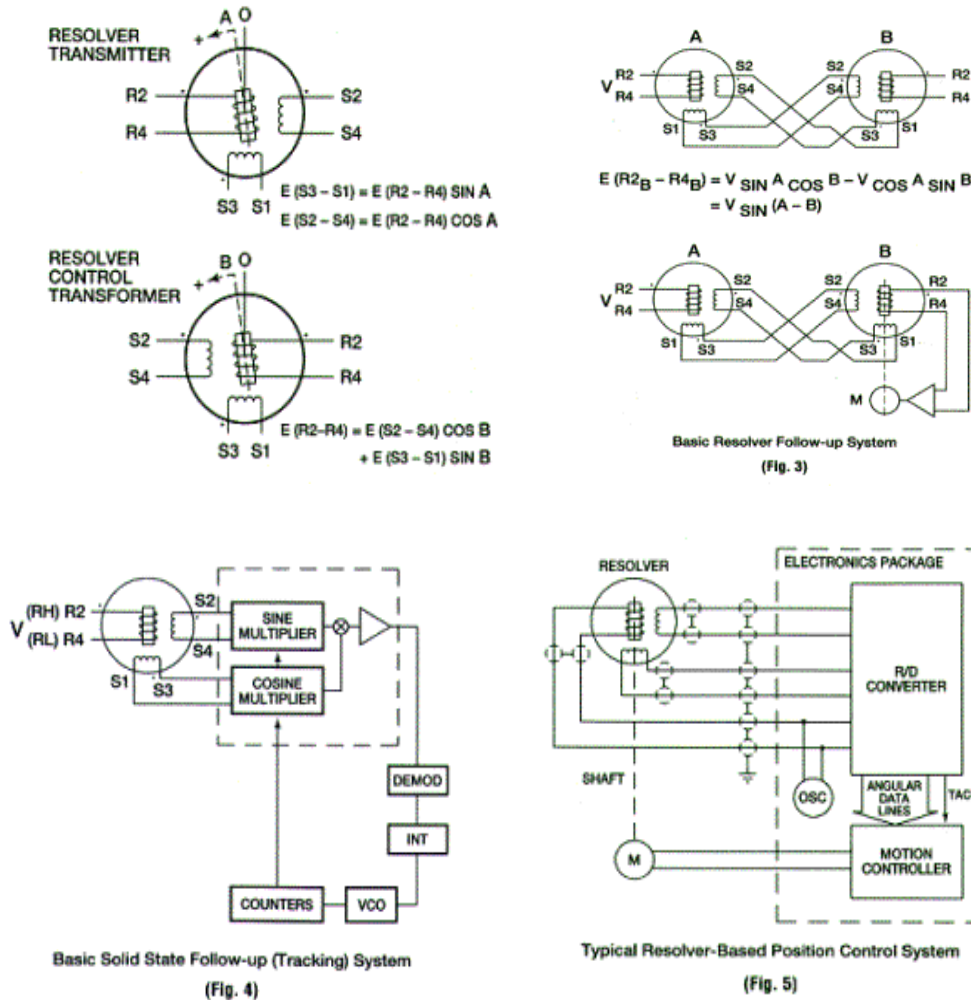
El giro de la bobina móvil hace que el acoplamiento con las bobinas fijas varíe, consiguiendo que la señal resultante en éstas dependa del seno del ángulo de giro. La bobina móvil excitada con tensión $V \sin(\omega t)$ y girada un ángulo θ induce en las bobinas fijas situadas en cuadratura las siguientes tensiones:

$$V_1 = V \sin(\omega t) \sin \theta$$

$$V_2 = V \sin(\omega t) \cos \theta$$

que es llamada representación del ángulo θ en formato sincro. El cambio del llamado formato sincro a formato *resolver* o viceversa es inmediato, ya que se puede pasar de uno a otro a través de la llamada red de Scott, o transformador de Scott, o funcionamiento

bidireccional. Para poder tratar el sistema de control, la información generada por los *resolvers* y los **sincros** es necesario convertir las señales analógicas en digitales. Para ello se utilizan los llamados convertidores *resolver*/digital (*r/d*), que tradicionalmente se basan en dos tipos de estructuras distintas: **tracking** y muestreo (**sampling**).



Ambos captadores son del tipo absoluto en cada vuelta del eje acoplado a ellos. Entre sus ventajas destacan su buena robustez mecánica durante el funcionamiento y su inmunidad a contaminación, humedad, altas temperaturas y vibraciones. Debido a su reducido momento de inercia, imponen poca carga mecánica del funcionamiento del eje.

Comparación entre diferentes sensores de posición angular				
	Robustez mecánica	Rango dinámico	Resolución	Estabilidad térmica
<i>Encoder</i>	mala	media	buena	buena
<i>Resolver</i>	buena	buena	buena	buena
Potenciómetro	regular	mala	mala	mala

Dado el carácter continuo de la señal, la resolución de los *resolvers* es teóricamente infinita. Bien es verdad que depende en la mayoría de las ocasiones de una electrónica asociada, lo que limita la precisión de forma práctica. El rango dinámico se encuentra más limitado en el caso de los codificadores ópticos; la resolución viene limitada por el número de secciones opaco-transparentes que se utilicen.



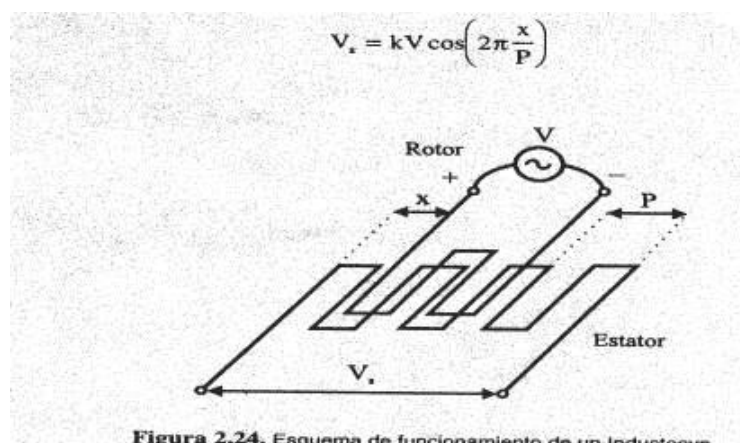
- **Sensores lineales de posición (LVDT)**

Entre los sensores de posición lineales destaca el transformador diferencial de variación lineal (LVDT) debido a su casi infinita resolución, poco rozamiento y alta repetibilidad. Su funcionamiento se basa en la utilización de un núcleo de material ferromagnético unido al eje cuyo movimiento se quiere medir. Este núcleo se mueve linealmente entre un devanado primario y dos secundarios, haciendo con su movimiento que varíe la inductancia entre ellos.

Los dos devanados secundarios conectados en oposición serie ven como la inducción de la tensión alterna del primario, al variar la posición del núcleo, hace crecer la tensión de un devanado y disminuir la del otro. Del estudio de la tensión se deduce que ésta es proporcional a la diferencia de inductancias mutuas entre el devanado primario con cada uno de los secundarios, y que por tanto depende linealmente del desplazamiento del vástago solidario al núcleo.

Además de las ventajas señaladas, el LVDT presenta una alta linealidad, gran sensibilidad y una respuesta dinámica elevada. Su uso está ampliamente extendido, a pesar del inconveniente de poder ser aplicado únicamente en la medición de pequeños desplazamientos.

Otros sensores lineales que también se emplean con relativa frecuencia son las denominadas reglas ópticas (equivalentes a los codificadores ópticos angulares) y las reglas magnéticas o *Inductosyn*. El funcionamiento del *Inductosyn* es similar a la del *resolver* con la diferencia de que el rotor desliza linealmente sobre el estator.



El estator se encuentra excitado por una tensión conocida que induce en el rotor dependiendo de su posición relativa una tensión V_s .

Sensores de velocidad

La captación de la velocidad se hace necesaria para mejorar el comportamiento dinámico de los actuadores del robot. La información de la velocidad de movimiento de cada actuador se realimenta normalmente a un bucle de control analógico implementado en el propio accionador del elemento motor. No obstante, en las ocasiones en las que el sistema de control del robot lo exija, la velocidad de giro de cada actuador es llevada hasta la unidad de control del robot.

Normalmente, y puesto que el bucle de control de velocidad es analógico, el sensor usado es una **taco generatriz** que proporciona una tensión proporcional a la velocidad de giro de su eje (10 mV por rpm).

Otra posibilidad, usada para el caso de que la unidad de control del robot precise conocer la velocidad de giro de las articulaciones, consiste en derivar la información de posición que ésta posee.

Sensores de presencia

Este tipo de sensor es capaz de detectar la presencia de un objeto dentro de un radio de acción determinado. Esta detección puede hacerse con o sin contacto con el objeto. En el segundo caso se utilizan diferentes principios físicos para detectar la presencia, dando lugar a los diferentes tipos de sensores. En el caso de detección con contacto, se trata siempre de un interruptor, normalmente abierto o normalmente cerrado según interese, actuando mecánicamente a través de un vástago u otro dispositivo. Los detectores de presencia se utilizan en robótica principalmente como auxiliares de los detectores de posición, para indicar los límites de las articulaciones y permitir localizar la posición de referencia de cero de éstos en el caso de que sean incrementales.

Además de esta aplicación, los sensores de presencia se usan como sensores externos, siendo muy sencillos de incorporar al robot por su carácter binario y su costo reducido. Los detectores inductivos permiten detectar la presencia o contar el número de objetos metálicos sin necesidad de contacto. Presentan el inconveniente de distinto comportamiento según del tipo de metal del que se trate. El mismo tipo de aplicación tienen los detectores capacitivos, más voluminosos, aunque en este caso los objetos a detectar no precisan ser metálicos. En cambio presentan problemas de trabajo en condiciones húmedas y con puestas a tierra defectuosa.

Los sensores basados en el **efecto Hall** detectan la presencia de objetos ferromagnéticos por la deformación que estos provocan sobre un campo magnético. Los sensores ópticos, sin embargo, pueden detectar la reflexión del rayo de luz procedente del emisor sobre el objeto.

Los **sensores/conmutadores Reed** de proximidad (frecuentemente referidos como sensores magnéticos) son muy tolerantes al desalineamiento y se ajustan bien a entornos contaminados por polvo y líquido. Constan de dos partes, el conmutador reed y el

actuador magnético. El conmutador reed cambia su estado cuando el actuador magnético se acerca a él, sin necesidad de que exista contacto físico entre ambos. La distancia de operación puede variarse con una adecuada elección del actuador magnético. Las configuraciones del conmutador con contactos normalmente abiertos o intercambiables.



Sensor Reed en miniatura

Sensores externos

El empleo de mecanismos de detección exteriores permite a un robot interactuar con su ambiente de una manera flexible. Esto contrasta con el funcionamiento preprogramado en el que a un robot se le enseña a realizar tareas repetitivas mediante una serie de funciones preprogramadas. Aunque esto está bastante lejos de la forma más predominante de funcionamiento de los robots industriales actuales, la utilización de la tecnología de detección para proporcionar a las máquinas un mayor grado de inteligencia en relación con su ambiente es, en realidad, un tema activo de investigación y desarrollo en el campo de la robótica.

Un robot que puede ver y sentir es más fácil de entrenar en la ejecución de las tareas complejas mientras que, al mismo tiempo, exige mecanismos de control menos estrictos que las máquinas preprogramadas. Un sistema sensible y susceptible de entrenamiento es también adaptable a una gama mucho más amplia de tareas, con lo que se consigue un grado de universalidad que se traduce, a la larga, en más bajos costes de producción y mantenimiento.

Como se ha comentado anteriormente la función de los sensores del robot puede dividirse en dos categorías principales: **estado interno** y **estado externo**.

Los sensores de **estado interno** operan con la detección de variables, tales como la posición de la articulación del brazo, que se utilizan para el control del robot.

Por el contrario, los sensores de **estado externo** operan con la detección de variables tales como:

- el alcance
- la proximidad
- el contacto

La detección externa, se utiliza para el guiado del robot, así como para la manipulación e identificación de objetos.

Los sensores de estado externo pueden clasificarse también como sensores de:

- contacto
- no contacto

Como su nombre lo indica, la primera clase de sensores responde al contacto físico, tal como el tacto, deslizamiento y torsión. Los sensores de no contacto se basan en la respuesta de un detector a las variaciones en la radiación electromagnética o acústica.

Los ejemplos más destacados de los sensores de no contacto miden el alcance, la proximidad y las propiedades visuales de un objeto.

Es de interés destacar que la detección de **alcance** y la **visión** suelen proporcionar una información de guiado aproximado para un manipulador, mientras que la **proximidad** y el **tacto** están asociados con fases terminales de agarre del objeto.

Los **sensores de fuerza y torsión** se utilizan como dispositivos de retroalimentación para controlar la manipulación de un objeto una vez que haya agarrado.

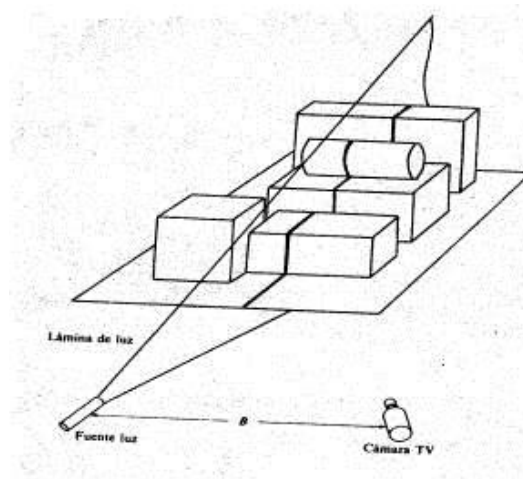
- Detección de alcance
- Detección de proximidad
- Sensores de contacto
- Detección de fuerza y torsión

Detección de alcance

Un sensor de alcance mide la distancia desde un punto de referencia (que suele estar en el propio sensor) hasta objetos en el campo de operación del sensor. Los seres humanos estiman la distancia por medio de un procesamiento visual estereográfico. Los sensores de alcance se utilizan para la navegación de robots y para evitar obstáculos, para aplicaciones más detalladas en las que se desean las características de localización y forma en general de objetos en el espacio de trabajo de un robot.

- **Triangulación**

Uno de los métodos más sencillos para medir alcance es mediante técnicas de **triangulación**. Este procedimiento puede explicarse con facilidad haciendo referencia a la siguiente figura.



Un objeto se ilumina por un estrecho haz de luz, que barre toda la superficie. El movimiento de barrido está en el plano definido por la línea desde el objeto hasta el detector y por la línea desde el detector hasta la fuente. Si el detector se enfoca sobre una pequeña parte de la superficie, entonces, cuando el detector vea la mancha luminosa, su distancia a la parte iluminada de la superficie puede calcularse a partir de la geometría de la figura, puesto que se conocen el ángulo de la fuente con la línea de base y la distancia entre la fuente y el detector.

El método anterior proporciona una medida puntual. Si la disposición de fuente-detector se desplaza en un plano fijo (hacia arriba y abajo y en sentido lateral en un plano perpendicular al papel y que contenga la línea de la base en la figura), será posible

obtener una serie de puntos cuyas distancias desde el detector serán conocidas. Estas distancias se transforman con facilidad en coordenadas tridimensionales manteniendo un registro de la localización y orientación del detector a medida que se exploran los objetos.

- **Método de iluminación estructural**

Este método consiste en proyectar una configuración de luz sobre un conjunto de objetos y en utilizar la distorsión de la sufrida para calcular el alcance.

Una de las configuraciones de luz de mayor difusión actual es una lámina de luz generada a través de una lente cilíndrica o de una hendidura estrecha. La intersección de la lámina de luz con objetos, en el espacio de trabajo, proporciona una franja de luz que se observa a través de una cámara de televisión desplazada en una cierta distancia desde la fuente de luz. La configuración de franjas se analiza con facilidad por una ordenadora para tener información del alcance. Por ejemplo una inflexión indica un cambio de superficie y una rotura corresponde a una separación entre superficies. Los valores de alcances específicos se calculan calibrando primero el sistema.

En una de las disposiciones más simples, la fuente de luz es perpendicular a la línea que une el origen de dicha lámina y el centro de la lente de la cámara. Al plano vertical que contiene esta línea le llamaremos plano de referencia. Es evidente que el plano de referencia es perpendicular a la lámina de luz y cualquier superficie de plano vertical que corte producirá una franja vertical de luz, en la que cada punto tendrá la misma distancia perpendicular al plano de referencia. El objetivo de la disposición es situar la cámara de modo que cada una de dichas franjas verticales aparezca también vertical en el plano de la imagen. De esta manera, cada punto a lo largo de la misma columna de la imagen será reconocido como que tiene la misma distancia al plano de referencia.

- **Telémetro de tiempo de vuelo**

En esta sección examinaremos tres métodos para determinar la distancia basada en el concepto de tiempo de vuelo. Dos de los métodos utilizan un láser, mientras que el tercero está basado en la ultrasónica.

Un método para utilizar un láser para determinar la distancia consistente en medir el tiempo que tarda un pulso de luz emitido para retornar de forma coaxial (es decir, a lo largo de la misma trayectoria) desde una superficie reflectora. La distancia a la superficie

viene dada por la simple relación $D = c T / 2$, en donde T es el tiempo de transito del pulso y c es la velocidad de la luz.

Es de interés destacar que, puesto que la luz se desplaza a una velocidad aproximada de 1 pie/ns, la instrumentación electrónica de apoyo debe ser capaz de una resolución de tiempo de 50 PS para poder conseguir una exactitud de $\pm 1/4$ pulgada en distancia.

Un sistema de láser pulsado descrito por Jarvis produce una disposición bidimensional con valores proporcionales a la distancia: la exploración bidimensional con valores proporcionales a la distancia. La exploración bidimensional se realiza desviando la luz láser a través de un espejo giratorio.

El margen de trabajo de este dispositivo es del orden de magnitud de 1 a 4 metros, con una exactitud de ± 0.25 cm. La luz detectada se visualiza como una imagen en la que la intensidad en cada punto es proporcional a la distancia entre el sensor y la superficie reflectora en ese punto (más oscura cuanto más próxima esta). Las zonas brillantes alrededor de los contornos de los objetos representan la discontinuidad en el alcance, determinada mediante un postprocesamiento en un ordenador.

Una alternativa a la luz pulsada es utilizar un láser de haz continuo y medir el retardo (es decir, el desplazamiento de fase) entre los haces saliente y de retorno.

Supóngase que un haz de luz de láser de longitud de onda λ está dividido en dos haces. Uno de ellos denominado haz de referencia se desplaza una distancia L de un dispositivo de medición de fase y el otro se desplaza a una distancia D de una superficie reflectora. Puesto que la longitud de onda de la luz láser es pequeña (por ejemplo, 632.8 nm para un láser de helio-neón), el método no resulta práctico para las aplicaciones robóticas.

Una solución simple a este problema es modular la amplitud de la luz de láser utilizando una forma de onda de longitud de onda mucho mayor (por ejemplo, una onda sinusoidal moduladora de frecuencia $f = 10$ Mhz tiene una longitud de 30 metros).

Pero la señal de referencia es ahora la función modulante. La señal de láser modulada se envía al banco y el haz de retorno de la señal moduladora, que luego se compara con la de referencia para determinar el desplazamiento de fase.

Una ventaja importante en la técnica de la luz continua frente a la luz pulsada es que la primera proporciona información de la intensidad y del alcance. Sin embargo, los sistemas continuos exigen una potencia considerablemente mayor. Las incertidumbres en las mediciones de la distancia obtenidas por una u otra técnica exigen promediar la señal de retorno para reducir el error.

Un **telémetro ultrasónico** es otro exponente importante del concepto del tiempo de vuelo. La idea básica es la misma que se utiliza con un láser pulsado.

Una señal ultrasónica se transmite durante un corto período de tiempo y, puesto que la velocidad de sonido se conoce para un medio de propagación especificado, un simple cálculo, que implica el intervalo de tiempo entre el impulso saliente y el eco de retorno como proporciona una estimación de la distancia a la superficie reflectora.

Se utilizan principalmente para navegación y para evitar obstáculos.

Detección de proximidad

Los sensores examinados anteriormente proporcionan una estimación de la distancia entre un sensor y un objeto reflectante. Por el contrario, los sensores de proximidad suelen tener una salida binaria que indica la presencia de un objeto dentro de un intervalo de distancia especificado. En condiciones normales, los sensores de proximidad se utilizan en robótica para un trabajo en campo cercano en relación a agarrar o evitar un objeto.

- **Sensores inductivos**

Los sensores basados en un cambio de inductancia debido a la presencia de un objeto metálico están entre los sensores de proximidad industriales de más frecuente uso. El principio de funcionamiento de estos sensores puede observarse en las siguientes figuras.

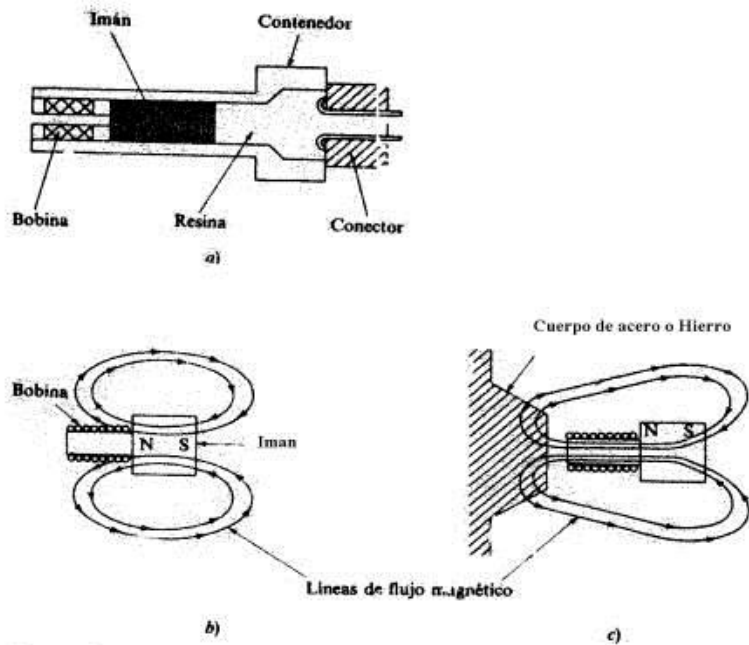


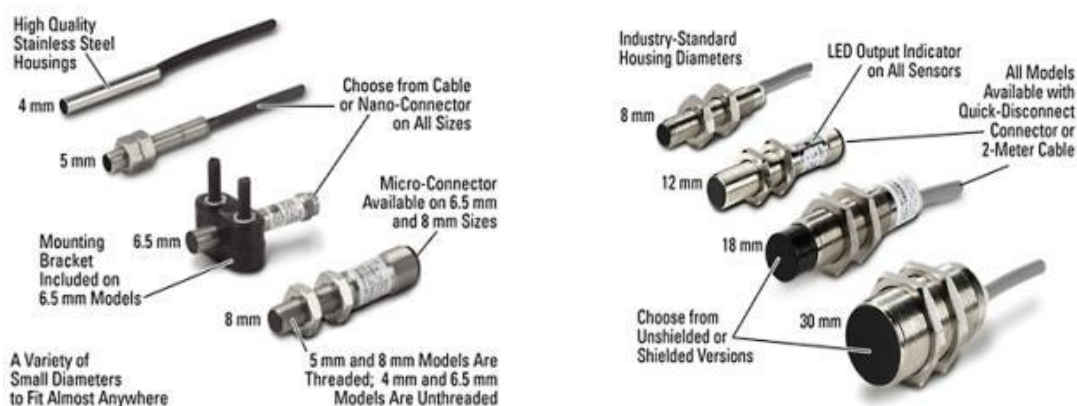
Figura 6.8 a) Un sensor inductivo. b) Forma de las líneas de flujo en la ausencia de un cuerpo ferromagnético. c) Formas de las líneas de flujo cuando un cuerpo ferromagnético se lleva a las proximidades del sensor.

La figura muestra un diagrama esquemático de un sensor inductivo, que consiste fundamentalmente en una bobina arrollada, situada junto a un imán permanente empaquetado en un receptáculo simple y robusto.

El efecto de llevar el sensor a la proximidad de un material ferromagnético produce un cambio en la posición de las líneas de flujo del imán permanente según se indica en la figura. En condiciones estáticas no hay ningún movimiento en las líneas de flujo y, por consiguiente, no se induce ninguna corriente en la bobina. Sin embargo, cuando un objeto ferromagnético penetra en el campo del imán o lo abandona, el cambio resultante en las líneas de flujo induce un impulso de corriente, cuya amplitud y forma son proporcionales a la velocidad de cambio de flujo.

La forma de onda de la tensión, observada a la salida de la bobina, proporciona un medio efectivo para la detección de proximidad. La tensión medida a través de la bobina varía como una función de la velocidad a la que un material ferromagnético se introduce en el campo del imán. La polaridad de la tensión, fuera del sensor, depende de que el objeto este penetrando en el campo abandonándolo.

Existe una relación entre la amplitud de la tensión y la distancia sensor-objeto. La sensibilidad cae rápidamente al aumentar la distancia, y el sensor sólo es eficaz para fracciones de un milímetro.



Puesto que el sensor requiere movimiento para generar una forma de onda de salida, un método para producir una señal binaria es integrar esta forma de onda. La salida binaria se mantiene a nivel bajo en tanto que el valor integral permanezca por debajo de un umbral especificado, y luego se conmuta a nivel alto (indicando la proximidad de un objeto) cuando se supera el umbral.

- **Sensores de efecto Hall**

El efecto Hall relaciona la tensión entre dos puntos de un material conductor o semiconductor con un campo magnético a través del material. Cuando se utilizan por sí mismos, los sensores de efecto Hall sólo pueden detectar objetos magnetizados. Sin embargo, cuando se emplean en conjunción con un imán permanente en la configuración tal como la indicada en la figura, son capaces de detectar todos los materiales ferromagnéticos.

Cuando se utilizan de dicha manera, un dispositivo de efecto Hall detecta un campo magnético intenso en ausencia de un material ferromagnético en el campo cercano, ver la siguiente figura.

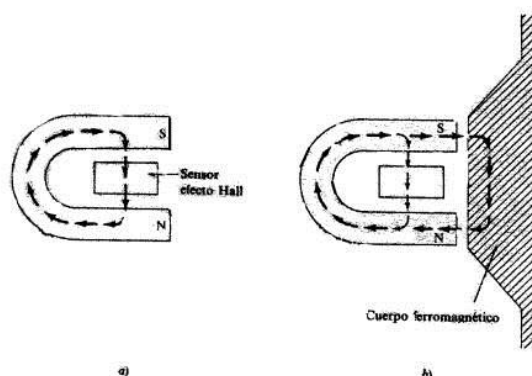


Figura 6.10 Funcionamiento de un sensor de efecto Hall en conjunción con un imán permanente. (Adaptado de Canali [1981a]. © Società Italiana di Fisica.)

Cuando dicho material se lleva a la proximidad del dispositivo, el campo magnético se debilita en el sensor debido a la curvatura de las líneas del campo a través del material. Los sensores de efecto Hall están basados en el principio de una fuerza de Lorentz que actúa sobre una partícula cargada que se desplaza a través de un campo magnético. Esta fuerza actúa sobre un eje perpendicular al plano establecido por la dirección de movimiento de la partícula cargada y la dirección del campo. Es decir, la fuerza de Lorentz viene dada por $F = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$, en donde q es la carga, \mathbf{v} es el vector de velocidad, \mathbf{B} es el vector del campo magnético y \times indica el producto vectorial.

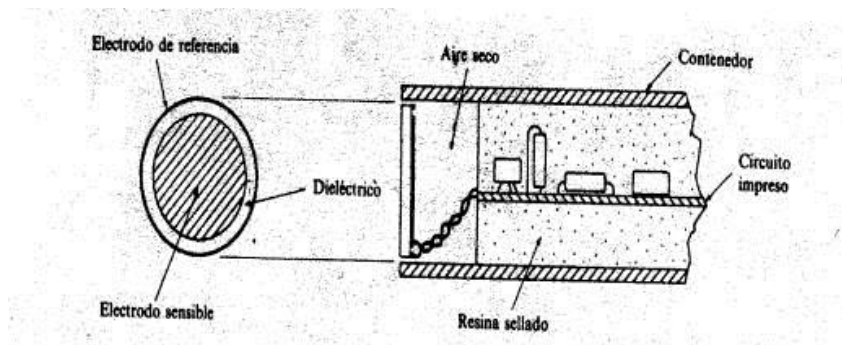
Al llevar un material ferromagnético cerca del dispositivo de imán semiconductor disminuirá la intensidad del campo magnético, con la consiguiente reducción de la fuerza de Lorentz y, finalmente, la tensión a través del semiconductor.

Esta caída en la tensión es la clave para detectar la proximidad con sensores de efecto Hall. Las decisiones binarias con respecto a la presencia de un objeto se realizan estableciendo un umbral de la tensión fuera del sensor.

Además, la utilización de materiales semiconductores permite la construcción de circuitos electrónicos para amplificación y detección directamente en el propio sensor, con lo que se reduce el tamaño y el coste del mismo.

- **Sensores capacitivos**

A diferencia con los sensores inductivos y de efecto Hall que detectan solamente materiales ferromagnéticos, los sensores capacitivos son potencialmente capaces (con diversos grados de sensibilidad) de detectar todos los materiales sólidos y líquidos. Como su nombre indica, estos sensores están basados en la detección de un cambio en la capacidad inducido por una superficie que se lleva cerca del elemento sensor.



El elemento sensor es un condensador constituido por un electrodo sensible y un electrodo de referencia. Estos electrodos pueden ser, por ejemplo, un disco y un anillo metálicos separados por un material dieléctrico. Una cavidad de aire seco se suele colocar detrás del elemento capacitivo para proporcionar aislamiento. El resto del sensor está constituido por circuitos electrónicos que pueden incluirse como una parte integral de la unidad, en cuyo caso suelen estar embebidos en una resina para proporcionar soporte mecánico y sellado.



Hay varios métodos electrónicos para detectar la proximidad basada en cambios de la capacidad. Uno de los más simples incluye el condensador como parte de un circuito oscilador diseñado de modo que la oscilación se inicie solamente cuando la capacidad del sensor sea superior a un valor umbral preestablecido. La iniciación de la oscilación se traduce luego en una tensión de salida, que indica la presencia de un objeto. Este método proporciona una salida binaria, cuya sensibilidad de disparo dependerá del valor umbral.

La capacidad varía como una función de la distancia para un sensor de proximidad basado en los conceptos anteriores. Es de interés destacar que la sensibilidad disminuye mucho cuando la distancia es superior a unos pocos milímetros y que la forma de la curva de respuesta depende del material objeto de detección. En condiciones normales, estos sensores son accionados en un modo binario, de modo que un cambio en la capacidad mayor que en un umbral preestablecido T indica la presencia de un objeto, mientras que los cambios por debajo del umbral indican la ausencia de un objeto con respecto a los límites de detección establecidos por el valor de T .

- **Sensores ultrasónicos**

La respuesta de todos los sensores de proximidad hasta ahora examinados depende, en gran medida, del material objeto de la detección. Esta dependencia puede reducirse mucho utilizando sensores ultrasónicos.



En la estructura de un transductor ultrasónico típico utilizado para detección de proximidad el elemento básico es un transductor electroacústico, frecuentemente del tipo cerámico piezoeléctrico. La capa de resina protege al transductor contra la humedad, polvo y otros factores ambientales y también actúa como un adaptador de impedancia acústica. Puesto que el mismo transductor se suele utilizar para la transmisión y la recepción, un amortiguamiento rápido de la energía acústica es necesario para detectar objetos a pequeña distancia. Esta operación se realiza proporcionando absolvedores acústicos y desacoplando el transductor de su receptáculo. Este último está diseñado de modo que produzca un haz acústico estrecho para una eficaz transferencia de energía y una mejor direccionalidad de la señal.

- **Sensores de proximidad ópticos**

Los sensores de proximidad ópticos son similares a los sensores ultrasónicos en el sentido de que detectan la proximidad de un objeto por su influencia sobre una onda propagadora que se desplaza desde un transmisor hasta un receptor. Uno de los métodos más utilizados para detectar la proximidad por medio de ópticos se muestra en la figura. Este sensor está constituido por un diodo emisor de luz de estado sólido (LED), que actúa como un transmisor de luz infrarroja y un fotodiodo de estado sólido que actúa como el receptor.

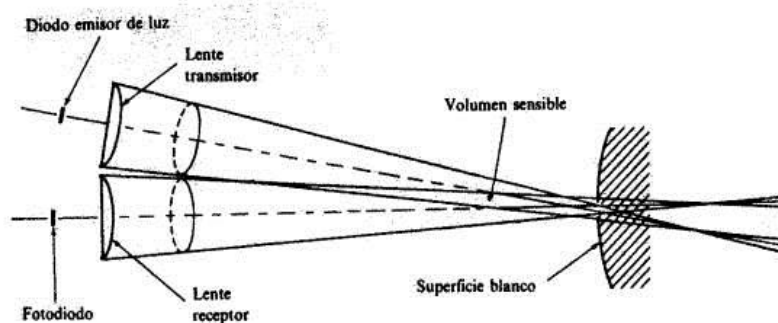


Figura 6.16 Sensor de proximidad óptico.

Los conos de luz formados enfocando la fuente y el detector en el mismo plano se intersectan en un volumen largo en forma de lápiz. Este volumen define el campo de operación del sensor, puesto que una superficie reflectora que intersecta el volumen se ilumina por la fuente y es vista simultáneamente por el receptor.

Dicho de otro modo, una superficie localizada en cualquier lugar en el volumen producirá una lectura. Aunque es posible calibrar la intensidad de estas lecturas como una función de la distancia para características reflectoras y orientaciones del objeto conocidas, la aplicación típica está en un modo en donde una señal binaria recibe una intensidad de luz superior a un valor umbral.

Sensores de contacto

Estos sensores se utilizan en robótica para obtener información asociada con el contacto entre una mano manipuladora y objetos en el espacio de trabajo.

Cualquier información puede utilizarse, por ejemplo, para la localización y el reconocimiento del objeto, así como para controlar la fuerza ejercida por un manipulador sobre un objeto dado. Los sensores de contacto pueden subdividirse en dos categorías principales:

- binarios
- analógicos

Los sensores binarios son esencialmente conmutadores que responden a la presencia o ausencia de un objeto. Por el contrario los sensores analógicos proporcionan a la salida una señal proporcional a una fuerza local.

- **Sensores binarios**

Los sensores binarios son dispositivos de contacto tales como micro interruptores. En la disposición más simple, un conmutador está situado en la superficie interior de cada dedo de una mano de manipulación. Este tipo de detección es de utilidad para determinar si una pieza está presente entre los dedos. Desplazando la mano sobre un objeto y estableciendo secuencialmente contacto con la superficie, también es posible centrar la mano sobre el objeto para su agarre y manipulación.

Sensores de contacto binarios múltiples pueden emplearse, en la superficie interior de cada dedo, para proporcionar información táctil. Además, suelen estar montados en las superficies exteriores de una mano de manipulación para proporcionar señales de control de utilidad para guiar la mano a través de todo el espacio de trabajo. Este último modo de detección por contacto es análogo al que los seres humanos sienten cuando se desplazan a través de un recinto completamente oscuro.

- **Sensores analógicos**

Un sensor de contacto analógico es un dispositivo cuya salida es proporcional a una fuerza local. El más simple de estos dispositivos está constituido por una varilla accionada por resorte que esta mecánicamente enlazada con un eje giratorio, de tal manera que el desplazamiento de la varilla debido a una fuerza lateral da lugar a una rotación proporcional del eje.

La rotación se mide luego, de manera continua, utilizando un potenciómetro, o de forma digital, con el uso de una rueda de código. El crecimiento de la constante del resorte proporciona la fuerza que corresponde a un desplazamiento dado.

En los últimos años se ha dedicado un esfuerzo considerable al desarrollo de conjuntos de detección táctil, capaces de proporcionar una información de contacto sobre un área más amplia que la proporcionada por un sensor único. El empleo de estos dispositivos se ilustra en la figura, que muestra una mano de robot en la que la superficie interior de cada dedo ha sido recubierta con un arreglo táctil de detección.

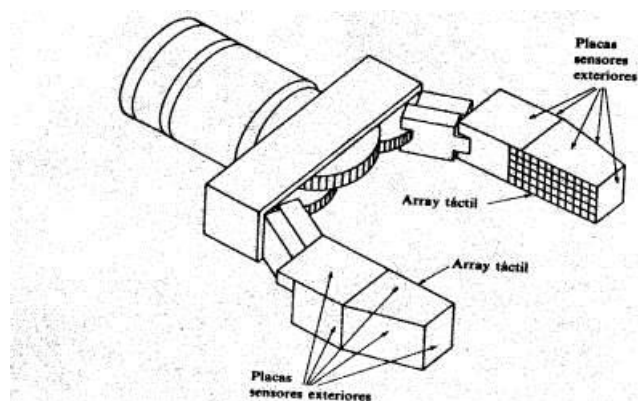


Figura 6.19 Un robot provisto de arrays sensores táctiles.

Las placas detectoras exteriores suelen ser dispositivos binarios. Aunque pueden formarse matrices de detección utilizando sensores individuales múltiples, una de las soluciones más prometedoras a este problema consiste en utilizar una matriz

de electrodos en contacto eléctrico con un material conductor dúctil (por ejemplo, sustancias basadas en grafito) cuya resistencia varía como una función de la compresión. En estos dispositivos, que suelen denominarse **pieles artificiales**, un objeto que presiona contra la superficie produce deformaciones locales que se miden como variaciones continuas de la resistencia. Estas últimas se transforman con facilidad en señales eléctricas, cuya amplitud es proporcional a la fuerza que se aplica en cualquier punto dado sobre la superficie del material.

- **El sensor de presión**

Se puede utilizar un sensor de presión para la retroalimentación mecánica de una mano, para controlar la fuerza de agarre, indicación sensible de cuando la mano sujeta un objeto.

Un **sensor óptico de presión** consiste en una superficie dividida en células por particiones opacas. Una fibra óptica trae luz a cada célula; la luz es emitida por un diodo u otra fuente. Otra fibra lleva luz de la célula a un sensor; por ejemplo, un fotodiodo o fototransistor. Las células son cubiertas por un material elástico con una superficie interior reflectante. El resto de la célula es de un material no reflectante. El cambio en la reflexión interior de luz es detectado por el sensor y se produce una señal que informa al operador de contacto. Cuanto mayor sea la presión, mayor es el cambio en la reflexión. Así, puede "sentirse" la presión utilizando circuitería analógica. Si se desea únicamente una indicación de contacto, un sensor de umbral puede ser incluido en la electrónica.

Todos los sensores de contacto mencionados hasta ahora se refieren a medidas de fuerzas normales a la superficie del sensor, aunque la medida del movimiento tangencial para determinar el deslizamiento es otro aspecto importante de la detección de contacto.

Detección de fuerza y torsión

Los sensores de fuerza y de torsión se utilizan principalmente para medir las fuerzas de reacción desarrolladas en la superficie de separación entre conjuntos mecánicos. Los métodos principales para realizar esta operación son los de **detección de articulación y muñeca**.

Un **sensor de articulación** mide los componentes cartesianos de la fuerza y de la torsión que actúan sobre una articulación de robot y la suma de forma vectorial. Para una

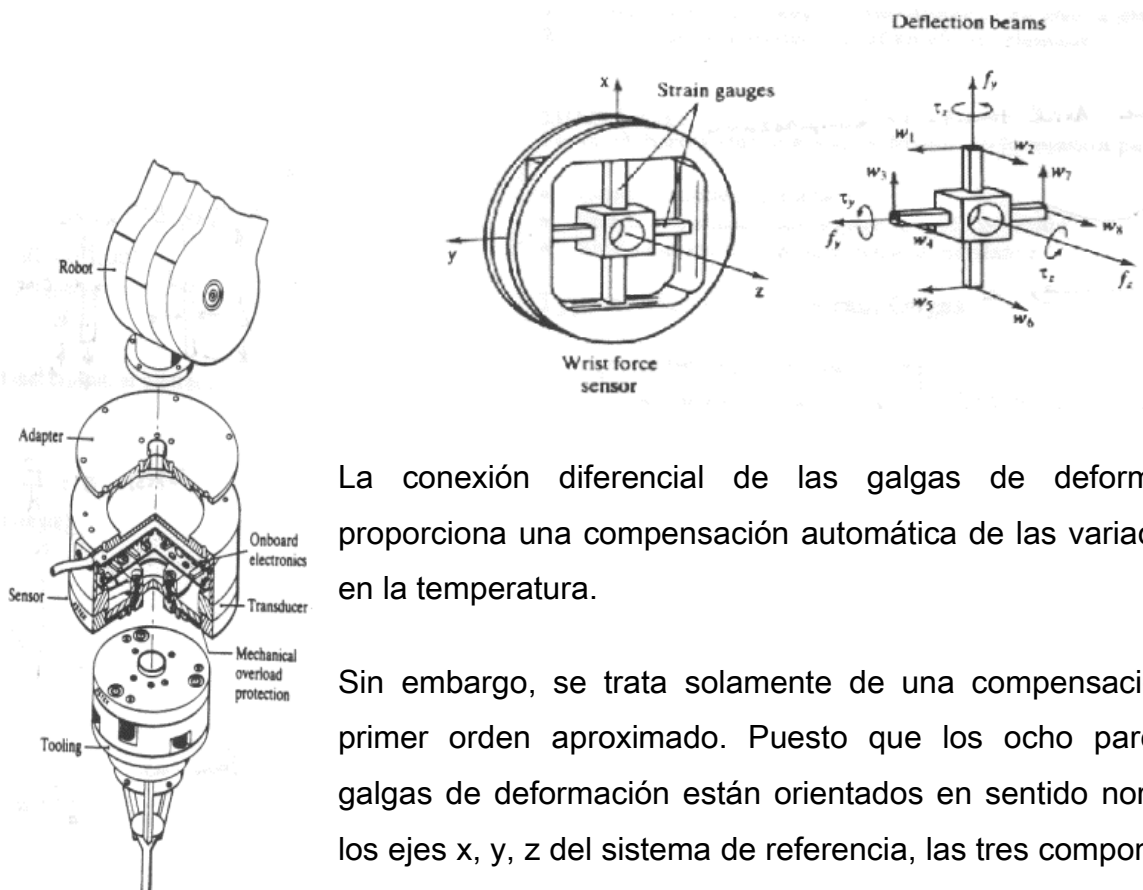
articulación impulsada por un motor de corriente continua, la detección se realiza simplemente midiendo la corriente del inducido.

Los **sensores de muñeca** están montados entre la extremidad de un brazo del robot y el actuador final. Están constituidos por galgas de deformaciones que miden la desviación de la estructura mecánica debida a fuerzas exteriores.

Los sensores de muñeca son pequeños, sensibles, de poco peso y de un diseño relativamente compacto, del orden de 10 cm de diámetro total y de 3 cm de espesor.

Para poder reducir la histéresis y aumentar la exactitud en la medida, el *hardware* se suele construir a partir de una pieza mecánica maciza, que suele ser de aluminio. Por ejemplo, el sensor mostrado en la figura utiliza ocho pares de galgas de deformaciones de semiconductores montadas en cuatro barras de deflexión (una galga a cada lado de una barra de deflexión).

Las galgas en los extremos abiertos opuestos de las barras de deflexión están cableadas, de manera diferencial, a un circuito potenciométrico, cuya tensión de salida es proporcional a la componente de la fuerza normal al plano de la galga de deformación.



La conexión diferencial de las galgas de deformación proporciona una compensación automática de las variaciones en la temperatura.

Sin embargo, se trata solamente de una compensación de primer orden aproximado. Puesto que los ocho pares de galgas de deformación están orientados en sentido normal a los ejes x, y, z del sistema de referencia, las tres componentes del momento M pueden determinarse sumando y restando

adecuadamente las tensiones de salida, respectivamente.

La mayoría de los sensores de fuerza de muñeca funcionan como transductores para transformar las fuerzas y los momentos ejercidos en la mano en desviaciones o desplazamientos medibles en la muñeca generados por el sensor de fuerza no afecten a la exactitud del posicionamiento del manipulador.

Por consiguiente, las especificaciones del rendimiento pueden resumirse como siguen:

- **Alta rigidez.** La frecuencia natural de un dispositivo mecánico está relacionada con su rigidez; así, la alta rigidez asegura que las fuerzas perturbadoras se amortigüen rápidamente para permitir lecturas exactas durante cortos intervalos de tiempo. Además, reduce la magnitud de las desviaciones de una fuerza / momento aplicado, lo que puede añadirse al error de posicionamiento de la mano.
- **Diseño compacto.** Este diseño asegura que el dispositivo no restrinja el movimiento del manipulador en un área de trabajo con poco espacio libre. Con el sensor de fuerza compacto, es importante colocar el sensor lo más próximo posible a la herramienta para reducir el error de posicionamiento como consecuencia del giro de la mano en pequeños ángulos. Además, es deseable medir una fuerza / momento de la mano lo más grande posible; así, al hacer mínima la distancia entre la mano y el sensor, se reduce el brazo de la palanca para las fuerzas aplicadas en la mano.
- **Linealidad.** Una buena linealidad entre la respuesta de los elementos detectores de la fuerza y las fuerzas / momentos aplicados permite resolver la fuerza y los momentos mediante simples operaciones matriciales.
- **Baja histéresis y rozamiento interno.** El rozamiento interno reduce la sensibilidad de los elementos detectores de la fuerza porque las fuerzas tienen que superar este rozamiento, o fricción, antes de que pueda obtenerse una desviación medible. Produce también efectos de histéresis que no restablecen los dispositivos de medida de la posición a sus lecturas originales.

ACTUADORES PARA ROBOT. SISTEMA DE ACCIONAMIENTO.

Los **actuadores** tienen como misión generar el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la **unidad de control** que es el que regula cada uno de los movimientos del manipulador, las acciones, cálculos y procesado de la información. La unidad de control o controlador recibe y envía señales a otras máquinas-herramientas (por medio de señales de entrada/salida) y almacena programas. Existen varios grados de control que están en función del tipo de parámetros que se regulan, lo que da lugar a los siguientes tipos de controladores:

- **de posición:** el controlador interviene únicamente en el control de la posición del elemento terminal;
- **cinemático:** en este caso el control se realiza sobre la posición y la velocidad;
- **dinámico:** además de regular la velocidad y la posición, controla las propiedades dinámicas del manipulador y de los elementos asociados a él;
- **adaptativo:** engloba todas las regulaciones anteriores y, además, se ocupa de controlar la variación de las características del manipulador al variar la posición

Otra clasificación de la unidad de control es la que distingue entre **control en bucle abierto** y **control en bucle cerrado**.

El control en bucle abierto da lugar a muchos errores, y aunque es más simple y económico que el control en bucle cerrado, no se admite en aplicaciones industriales en las que la exactitud es una cualidad imprescindible. La inmensa mayoría de los robots que hoy día se utilizan con fines industriales se controlan mediante un proceso en bucle cerrado, es decir, mediante un bucle de **realimentación**. Este control se lleva a cabo con el uso de un sensor de la posición real del elemento terminal del manipulador. La información recibida desde el sensor se compara con el valor inicial deseado y se actúa en función del error obtenido de forma tal que la posición real del brazo coincida con la que se había establecido inicialmente.

Los **actuadores**, éstos se clasifican en tres grandes grupos, según la energía que utilizan:

- Neumáticos
- Hidráulicos
- Eléctricos

Actuadores neumáticos

Los **actuadores neumáticos** utilizan el aire comprimido como fuente de energía y son muy indicados en el control de movimientos rápidos, pero de precisión limitada. Los motores hidráulicos son recomendables en los manipuladores que tienen una gran capacidad de carga, junto a una precisa regulación de velocidad. Los motores eléctricos son los más utilizados, por su fácil y preciso control, así como por otras propiedades ventajosas que establece su funcionamiento, como consecuencia del empleo de la energía eléctrica. En la página... se proporciona una tabla de comparación detallada entre los diferentes tipos de actuadores utilizados en robótica.

Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes, siendo preciso evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente. Las características a considerar son, entre otras:

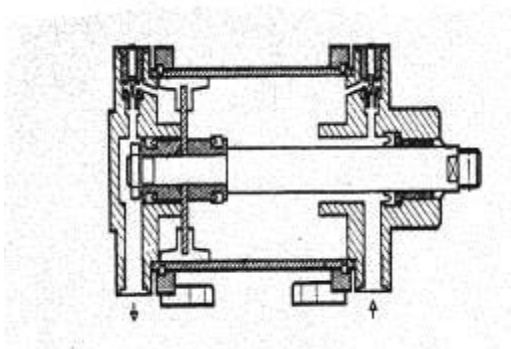
- Potencia
- Controlabilidad
- Peso y volumen
- Precisión
- Velocidad
- Mantenimiento
- Coste

En los actuadores neumáticos la fuente de energía es aire a presión entre 5 y 10 bar. Existen dos tipos de actuadores neumáticos:

- Cilindros neumáticos
- Motores neumáticos (de aletas rotativas o de pistones axiales).
- **Cilindros neumáticos**

En los primeros se consigue el desplazamiento de un émbolo encerrado en un cilindro como consecuencia de la diferencia de presión a ambos lados de aquél. Los cilindros neumáticos pueden ser **de simple** o **de doble efecto**. En los primeros, el émbolo se desplaza en un sentido como resultado del empuje ejercido por el aire a presión, mientras que en el otro sentido se desplaza como consecuencia del efecto de un muelle (que recupera al émbolo a su posición en reposo).

En los cilindros de doble efecto el aire a presión es el encargado de empujar al émbolo en las dos direcciones, al poder ser introducido de forma arbitraria en cualquiera de las dos cámaras.



Normalmente, con los cilindros neumáticos sólo se persigue un posicionamiento en los extremos del mismo y no un posicionamiento continuo. Esto último se puede conseguir con una válvula de distribución (generalmente de accionamiento directo) que canaliza el aire a presión hacia una de las dos caras del émbolo alternativamente. Existen, no obstante, sistemas de posicionamiento continuo de accionamiento neumático, aunque debido a su coste y calidad todavía no resultan competitivos.

- **Motores neumáticos**

En los motores neumáticos se consigue el movimiento de rotación de un eje mediante aire a presión. Los dos tipos más utilizados son los **motores de aletas rotativas** y los **motores de pistones axiales**.

Los motores de pistones axiales tienen un eje de giro solidario a un tambor que se ve obligado a girar ante las fuerzas que ejercen varios cilindros, que se apoyan sobre un plano inclinado. Otro método común más sencillo de obtener movimientos de rotación a partir de actuadores neumáticos, se basa en el empleo de cilindros cuyo émbolo se encuentra acoplado a un sistema de piñón-cremallera.

En general y debido a la compresibilidad del aire, los actuadores neumáticos no consiguen una buena precisión de posicionamiento. Sin embargo, su sencillez y robustez hacen adecuado su uso en aquellos casos en los que sea suficiente un posicionamiento en dos situaciones diferentes (todo o nada). Por ejemplo, son utilizados en manipuladores sencillos, en apertura y cierre de pinzas o en determinadas articulaciones de algún robot (como el movimiento vertical del tercer grado de libertad de algunos robots tipo SCARA).

Siempre debe tenerse en cuenta que el empleo de un robot con algún tipo de accionamiento neumático deberá disponer de una instalación de aire comprimido, incluyendo: compresor, sistema de distribución (tuberías, electro válvulas), filtros, secadores, etc. No obstante, estas instalaciones neumáticas son frecuentes y existen en muchas de las fábricas donde se da cierto grado de automatización.

Actuadores hidráulicos

Este tipo de actuadores no se diferencia mucho de los neumáticos. En ellos, en vez de aire se utilizan aceites minerales a una presión comprendida normalmente entre los 50 y 100 bar, llegándose en ocasiones a superar los 300 bar. Existen, como en el caso de los neumáticos, actuadores del tipo cilindro y del tipo motores de aletas y pistones.

Sin embargo, las características del fluido utilizado en los actuadores hidráulicos marcan ciertas diferencias con los neumáticos. En primer lugar, el grado de compresibilidad de los aceites usados es considerablemente menor al del aire, por lo que la precisión obtenida en este caso es mayor. Por motivos similares, es más fácil en ellos realizar un control continuo, pudiendo posicionar su eje en todo un intervalo de valores (haciendo uso del servocontrol) con notable precisión. Además, las elevadas presiones de trabajo, diez veces superiores a las de los actuadores neumáticos, permiten desarrollar elevadas fuerzas y pares.

Por otra parte, este tipo de actuadores presenta estabilidad frente a cargas estáticas. Esto indica que el actuador es capaz de soportar cargas, como el peso o una presión ejercida sobre una superficie, sin aporte de energía (para mover el embolo de un cilindro sería preciso vaciar este de aceite). También es destacable su eleva capacidad de carga y relación potencia-peso, así como sus características de auto lubricación y robustez.

Frente a estas ventajas existen ciertos inconvenientes. Por ejemplo, las elevadas presiones a las que se trabaja propician la existencia de fugas de aceite a lo largo de la instalación. Asimismo, esta instalación es más complicada que la necesaria para los actuadores neumáticos y mucho más que para los eléctricos, necesitando de equipos de filtrado de partículas, eliminación de aire, sistemas de refrigeración y unidades de control de distribución.

Los accionamientos hidráulicos se usan con frecuencia en aquellos robots que deben manejar grandes cargas (de 70 a 205kg).

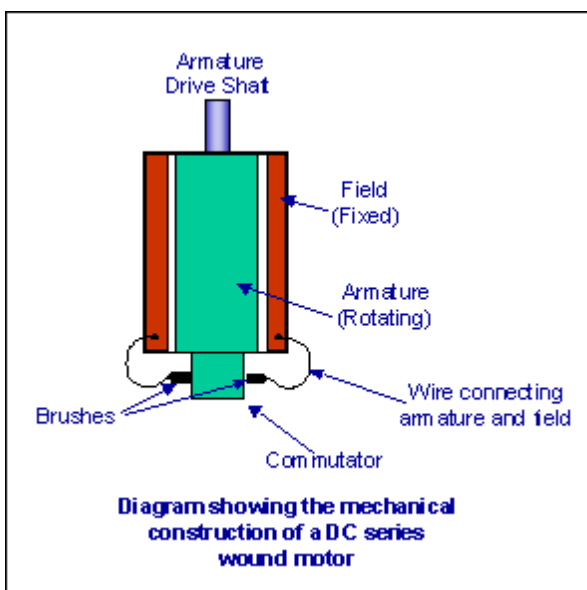
Actuadores eléctricos

Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en los robots industriales actuales.

Dentro de los actuadores eléctricos pueden distinguirse tres tipos diferentes:

- Motores de corriente continua (DC). Servomotores
- Motores paso a paso
- Motores de corriente alterna (AC)

- **Motores de corriente continua (DC). Servomotores**



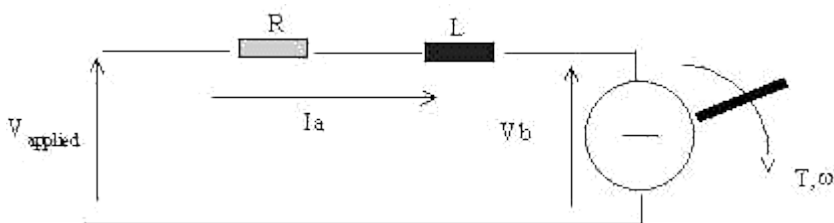
Son los más usados en la actualidad debido a su facilidad de control. En este caso, se utiliza en el propio motor un sensor de posición (Encoder) para poder realizar su control.

Los motores de DC están constituidos por dos devanados internos, inductor e inducido, que se alimentan con corriente continua:

El inducido, también denominado devanado de excitación, está situado en el estator y crea un campo magnético de dirección fija,

denominado excitación.

El inducido, situado en el rotor, hace girar al mismo debido a la fuerza de Lorentz que aparece como combinación de la corriente circulante por él y del campo magnético de excitación. Recibe la corriente del exterior a través del colector de delgas, en el que se apoyan unas escobillas de grafito.



Para que se pueda dar la conversión de energía eléctrica en energía mecánica de forma continua es necesario

que los campos magnéticos del estator y del rotor permanezcan estáticos entre sí. Esta transformación es máxima cuando ambos campos se encuentran en cuadratura. El colector de delgas es un conmutador sincronizado con el rotor encargado de que se mantenga el ángulo relativo entre el campo del estator y el creado por las corrientes rotóricas. De esta forma se consigue transformar automáticamente, en función de la velocidad de la máquina, la corriente continua que alimenta al motor en corriente alterna de frecuencia variable en el inducido. Este tipo de funcionamiento se conoce con el nombre de autopilotado.

Al aumentar la tensión del inducido aumenta la velocidad de la máquina. Si el motor está alimentado a tensión constante, se puede aumentar la velocidad disminuyendo el flujo de excitación. Pero cuanto más débil sea el flujo, menor será el par motor que se puede desarrollar para una intensidad de inducido constante, mientras que la tensión del inducido se utiliza para controlar la velocidad de giro.

En los controlados por excitación se actúa al contrario. Además, en los motores controlados por inducido se produce un efecto estabilizador de la velocidad de giro originado por la realimentación intrínseca que posee a través de la fuerza contraelectromotriz. Por estos motivos, de los dos tipos de motores DC es el controlado por inducido el que se usa en el accionamiento con robots.

Para mejorar el comportamiento de este tipo de motores, el campo de excitación se genera mediante imanes permanentes, con lo que se evitan fluctuaciones del mismo.



Estos imanes son de aleaciones especiales como sumario-cobalto. Además, para disminuir la inercia que poseería un rotor bobinado, que es el inducido, se construye éste mediante una serie de espiras serigrafiadas en un disco plano, este tipo de rotor no posee apenas masa térmica, lo que aumenta los problemas de calentamiento por sobrecarga.

Las velocidades de rotación que se consiguen con estos motores son del orden de 1000 a 3000 rpm con un comportamiento muy lineal y bajas constantes de tiempo. Las potencias que pueden manejar pueden llegar a los 10KW.

Como se ha indicado, los motores DC son controlados mediante referencias de velocidad. Éstas normalmente son seguidas mediante un bucle de retroalimentación de velocidad analógica que se cierra mediante una electrónica específica (accionador del motor). Se denominan entonces **servomotores**.

Sobre este bucle de velocidad se coloca otro de posición, en el que las referencias son generadas por la unidad de control (microprocesador) sobre la base del error entre la posición deseada y la real.

El motor de corriente continua presenta el inconveniente del obligado mantenimiento de las escobillas. Por otra parte, no es posible mantener el par con el rotor parado más de unos segundos, debido a los calentamientos que se producen en el colector.

Para evitar estos problemas, se han desarrollado en los últimos años motores sin escobillas. En estos, los imanes de excitación se sitúan en el rotor y el devanado de inducido en el estator, con lo que es posible convertir la corriente mediante interruptores estáticos, que reciben la señal de conmutación a través de un detector de posición del rotor.

- **Motores paso a paso**

Los motores paso a paso generalmente no han sido considerados dentro de los accionamientos industriales, debido principalmente a que los pares para los que estaban disponibles eran muy pequeños y los pasos entre posiciones consecutivas eran grandes. En los últimos años se han mejorado notablemente sus características técnicas, especialmente en lo relativo a su control, lo que ha permitido fabricar motores paso a paso capaces de desarrollar pares suficientes en pequeños pasos para su uso como accionamientos industriales.

Existen tres tipos de motores paso a paso:

- de imanes permanentes
- de reluctancia variable
- híbridos.

En los primeros, de **imanes permanentes**, el rotor, que posee una polarización magnética constante, gira para orientar sus polos de acuerdo al campo magnético creado por las fases del estator.

En los motores de **reluctancia variable**, el rotor está formado por un material ferromagnético que tiende a orientarse de modo que facilite el camino de las líneas de fuerza del campo magnético generado por las bobinas de estator. No contiene, por tanto, imanes permanentes. El estator es similar a un motor DC de escobillas.

La reluctancia de un circuito magnético es el equivalente magnético a la resistencia de un circuito eléctrico. La reluctancia del circuito disminuye cuando el rotor se alinea con el polo del estator. Cuando el rotor está en línea con el estator el hueco entre el rotor y el estator es muy pequeño. En este momento la reluctancia está al mínimo.

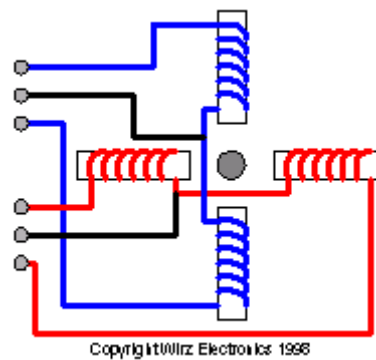
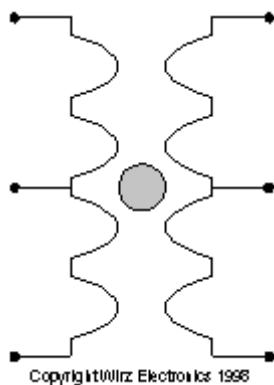
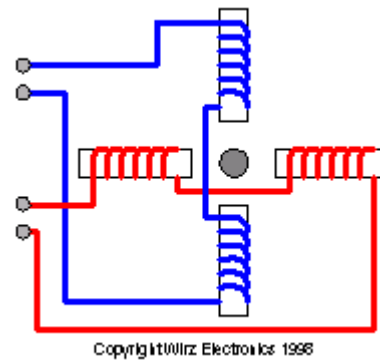
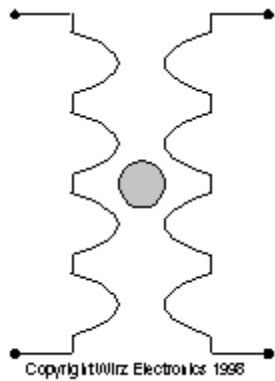
La inductancia del bobinado también varía cuando el rotor gira. Cuando el rotor está fuera de alineación, la inductancia es muy baja, y la corriente aumentará rápidamente. Cuando el rotor se alinea con el estator, la inductancia será muy grande. Esta es una de las dificultades del manejo de un motor de reluctancia variable.

Los motores **híbridos** combinan el modo de funcionamiento de los dos anteriores.

En los motores paso a paso la señal de control consiste en trenes de pulsos que van actuando rotativamente sobre una serie de electroimanes dispuestos en el estator. Por cada pulso recibido, el rotor del motor gira un determinado número discreto de grados. Para conseguir el giro del rotor en un determinado número de grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad de giro. Las inercias propias del arranque y parada (aumentadas por las fuerzas magnéticas en equilibrio que se dan cuando está parado) impiden que el rotor alcance la velocidad nominal instantáneamente, por lo que ésa, y por tanto la frecuencia de los pulsos que la fija, debe ser aumentada progresivamente.

Para simplificar el control de estos motores existen circuitos especializados que a partir de tres señales (tren de pulsos, sentido de giro e inhibición) generan, a través de una etapa lógica, las secuencias de pulsos que un circuito de conmutación distribuye a cada fase.

A continuación se muestran las configuraciones bipolar y unipolar respectivamente:



Su principal ventaja con respecto a los servomotores tradicionales es su capacidad para asegurar un posicionamiento simple y exacto. Pueden girar además de forma continua, con velocidad variable, como motores síncronos, ser sincronizados entre sí, obedecer a secuencias complejas de funcionamiento, etc. Se trata al mismo tiempo de motores muy ligeros, fiables, y fáciles de controlar, pues al ser cada estado de excitación del estator estable, el control se realiza en bucle abierto, sin la necesidad de sensores de realimentación.

Entre los inconvenientes se puede citar que su funcionamiento a bajas velocidades no es suave, y que existe el peligro de pérdida de una posición por trabajar en bucle abierto. Tienden a sobrecalentarse trabajando a velocidades elevadas y presentan un límite en el tamaño que pueden alcanzar.

Su potencia nominal es baja y su precisión (mínimo ángulo girado) llega típicamente hasta 1.8° . Se emplean para el posicionado de ejes que no precisan grandes potencias (giro de pinza) o para robots pequeños (educacionales), también son muy utilizados en dispositivos periféricos del robot, como mesas de coordenadas.

- **Motores de corriente alterna**

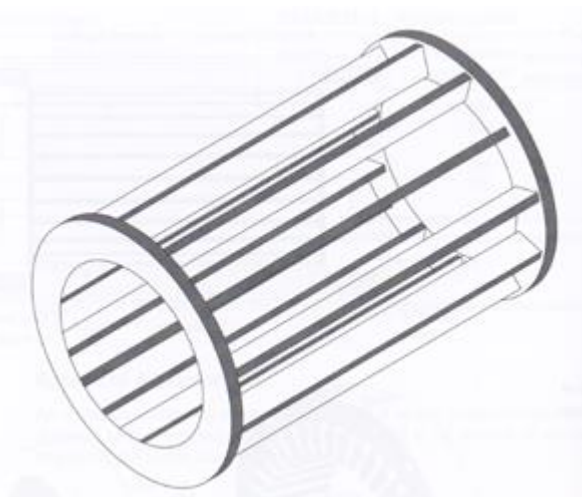
Este tipo de motores no ha tenido aplicación en robótica hasta hace unos años, debido fundamentalmente a la dificultad de su control. Sin embargo, las mejoras que se han introducido en las maquinas síncronas hacen que se presenten como un claro competidor de los motores de corriente continua. Esto se debe principalmente a tres factores:

- la construcción de los motores síncronos sin escobillas.
- el uso de convertidores estáticos que permiten variar la frecuencia (y así la velocidad de giro) con facilidad y precisión.
- el empleo de la microelectrónica, que permite una gran capacidad de control.

Existen dos tipos fundamentales de motores de corriente alterna:

- motores asíncronos
 - motores síncronos
- **Motores asíncronos de inducción**

Son probablemente los más sencillos y robustos de los motores eléctricos. El rotor está constituido por varias barras conductoras dispuestas paralelamente al eje del motor y por dos anillos conductores en los extremos. El conjunto es similar a una jaula de ardilla y por eso se le denomina también motor de jaula de ardilla. El estator consta de un conjunto de bobinas, de modo que cuando la corriente alterna trifásica las atraviesa, se forma un campo magnético rotatorio en las proximidades del estator. Esto induce corriente en el rotor, que crea su propio campo magnético. La interacción entre ambos campos produce un par en el rotor. No existe conexión eléctrica directa entre estator y rotor.





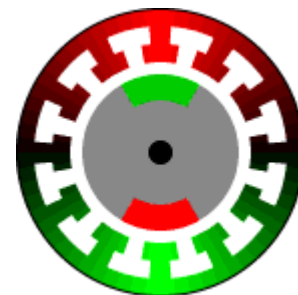
La frecuencia de la corriente alterna de la alimentación determina la velocidad a la cual rota el campo magnético del estator. El rotor sigue a este campo, girando más despacio. La diferencia de velocidades se denomina deslizamiento. La imagen adjunta exagera el deslizamiento. Si deslizamiento normal ronda el 5%.

- **Motores síncronos**

Se sitúa el puntero del ratón en uno de los polos del rotor y se sigue se notará que no rota como el campo del estator. En la animación el deslizamiento es aproximadamente el 25%.

El motor síncrono, como su nombre indica, opera exactamente a la misma velocidad que le campo del estator, sin deslizamiento.

El inducido se sitúa en el rotor, que tiene polaridad constante (imanes permanentes o bobinas), mientras que el inductor situado en el estator, está formado por tres devanados iguales decalados 120° eléctricos y se alimenta con un sistema trifásico de tensiones. Es preciso resaltar la similitud existente entre este esquema de funcionamiento y el del motor sin escobillas.



En los motores síncronos la velocidad de giro depende únicamente de la frecuencia de la tensión que alimenta el inducido. Para poder variar esta precisión, el control de velocidad se realiza mediante un convertidor de frecuencia. Para evitar el riesgo de pérdida de sincronismo se utiliza un sensor de posición continuo que detecta la posición del rotor y permite mantener en todo momento el ángulo que forman los campos del estator y rotor. Este método de control se conoce como autosíncrono o autopilotado.

El motor síncrono autopilotado excitado con un imán permanente, también llamado motor senoidal, no presenta problemas de mantenimiento debido a que no posee escobillas y tiene una gran capacidad de evacuación de calor, ya que los devanados están en contacto directo con la carcasa. El control de posición se puede realizar sin la utilización de un sensor adicional, aprovechando el detector de posición del rotor que posee el propio motor. Además permite desarrollar, a igualdad de peso, una potencia mayor que el motor de corriente continua.

En la actualidad diversos robots industriales emplean este tipo de accionamientos con notables ventajas frente a los motores de corriente continua.

En el caso de los motores asíncronos, no se ha conseguido resolver satisfactoriamente los problemas de control que presentan. Esto ha hecho que hasta el momento no tengan aplicación en robótica.

Comparación entre los diferentes tipos de actuadores

Como resumen de los actuadores utilizados en robótica se presenta la siguiente tabla:

Características de los distintos tipos de actuadores para robots			
	Neumáticos	Hidráulicos	Eléctricos
Energía	Aire a presión (5-10 bar)	Aceite mineral (50-100 bar)	Corriente eléctrica
Opciones	Cilindros Motor de paletas Motor de pistón	Cilindros Motor de paletas Motor de pistones axiales	Corriente continua Corriente alterna Motor paso a paso Servomotor
Ventajas	Baratos Rápidos Sencillos Robustos	Rápidos Alta relación potencia-peso Autolubricantes Alta capacidad de carga Estabilidad frente a cargas estáticas	Precisos Fiabiles Fácil control Sencilla instalación Silenciosos
Desventajas	Dificultad de control continuo Instalación especial (compresor, filtros) Ruidoso	Difícil mantenimiento Instalación especial (filtros, eliminación aire) Frecuentes fugas Caros	Potencia limitada