

ROBÓTICA



ROBÓTICA



INDICE DE CONTENIDO

1. Introducción (5)

¿Qué es la robótica?

¿De dónde proviene la palabra robot?. ¿Qué es un robot?

Tipos de robot

Impacto de la robótica

¿Qué esperamos?

2. Origen y desarrollo de la robótica (21)

Antecedentes históricos. Eras tecnológica

¿Cuándo aparecen los robots tal y como los conocemos en la actualidad?

Generaciones

Estado actual y perspectivas de la robótica mundial

3. Robots industriales (39)

Definición del robot industrial

Clasificación

4. Robots móviles. Diseño (45)

Locomoción

Adaptación de plataformas móviles

Sensores

5. Robots de servicio y teleoperados (58)

6. El sistema robótico (61)

Análisis del sistema. Unidades funcionales

Diseño de un robot

7. Estructura de un robot industrial (63)

Componentes

Principales características de los robots

Tipos de configuraciones morfológicas

8. Transmisiones y reductores (85)

Transmisiones

Reductores

9. Actuadores (88)

Neumáticos

Hidráulicos

Eléctricos

10. Sensores (106)

Internos

Externos

11. Elementos terminales o actuadores finales (130)

Introducción

Pinzas

Herramientas

12. Aplicaciones de la Robótica (136)

Clasificación

Aplicaciones industriales

Nuevos sectores de aplicación

13. Ejemplos de algunos robots comerciales (154)

1. Introducción

El término "Robótica" fue acuñado por Isaac Asimov para describir la tecnología de los robots. Él mismo predijo hace años el aumento de una poderosa industria robótica, predicción que ya se ha hecho realidad. Recientemente se ha producido una explosión en el desarrollo y uso industrial de los robots tal que se ha llegado al punto de hablar de "revolución de los robots" y "era de los robots".

❖ ¿Qué es la robótica?

El término robótica puede ser definido desde diversos puntos de vista:

- Con independencia respecto a la definición de "robot":
"La Robótica es la conexión inteligente de la percepción a la acción"...
[Michael Brady and Richard Paul, editors. Robotics Research: The First International Symposium. The MIT Press, Cambridge MA, 1984]
- En base a su objetivo:
"La Robótica consiste en el diseño de sistemas. Actuadores de locomoción, manipuladores, sistemas de control, sensores, fuentes de energía, software de calidad--todos estos subsistemas tienen que ser diseñados para trabajar conjuntamente en la consecución de la tarea del robot"...
[Joseph L. Jones and Anita M. Flynn. Mobile robots: Inspirations to implementation. A K Peters Ltd, 1993]
- Supeditada a la propia definición del término robot:
"La Robótica describe todas las tecnologías asociadas con los robots"

❖ ¿De dónde proviene la palabra robot? ¿Qué es un robot?

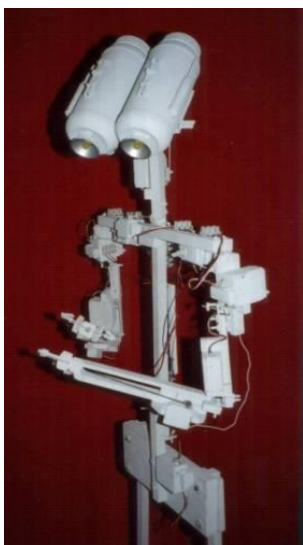
La palabra **robot** fue usada por primera vez en el año 1921, cuando el escritor checo Karel Capek (1890 - 1938) estrena en el teatro nacional de Praga su obra *Rossum's Universal Robot* (R.U.R.). Su origen es de la palabra eslava **robota**, que se refiere al trabajo realizado de manera forzada. La trama era sencilla: el hombre fabrica un robot, luego el robot mata al hombre.

Muchas películas han seguido mostrando a los robots como máquinas dañinas y amenazadoras. Sin embargo, películas más recientes, como la saga de "La Guerra de las Galaxias" desde 1977, retratan a robots como "C3PO" y "R2D2" como ayudantes del hombre. "Número 5" de "Cortocircuito" y "C3PO" realmente tienen apariencia humana. Estos robots que se fabrican con *look* humano se llaman 'androides'.

La mayoría de los expertos en Robótica afirmarían que es complicado dar una definición universalmente aceptada. Las definiciones son tan dispares como se demuestra en la siguiente relación:

- Ingenio mecánico controlado electrónicamente, capaz de moverse y ejecutar de forma automática acciones diversas, siguiendo un programa establecido.
- Máquina que en apariencia o comportamiento imita a las personas o a sus acciones como, por ejemplo, en el movimiento de sus extremidades
- Un robot es una máquina que hace algo automáticamente en respuesta a su entorno.
- Un robot es un puñado de motores controlados por un programa de ordenador.
- Un robot es un ordenador con músculos.

Es cierto, como acabamos de observar, que los robots son difíciles de definir. Sin embargo, no es necesariamente un problema el que no esté todo el mundo de acuerdo sobre su definición. Quizás, Joseph Engelberg (padre de la robótica industrial) lo



resumió inmejorablemente cuando dijo: "Puede que no se capaz de definirlo, pero sé cuándo veo uno".

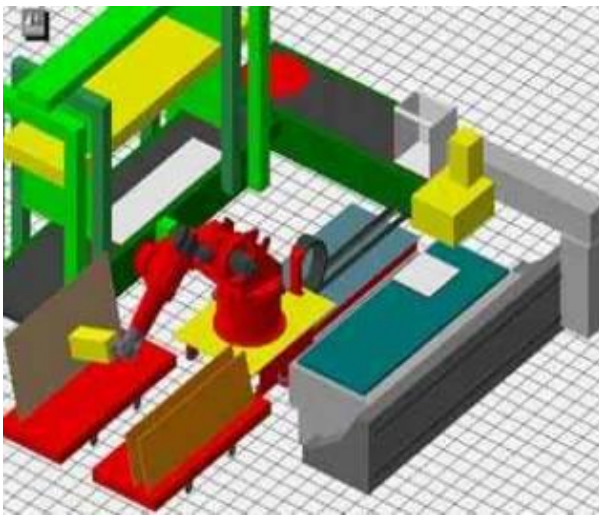
La imagen del robot como una máquina a semejanza del ser humano, subyace en el hombre desde hace muchos siglos, existiendo diversas realizaciones con este fin.

El ciudadano industrializado que vive a caballo entre el siglo XX y el XXI se ha visto en la necesidad de emprender, en escasos 25 años, el significado de un buen número de nuevos términos marcados por su alto contenido tecnológico. De ellos sin duda el más relevante haya sido el ordenador (ordenador).

Éste, está introducido hoy en día en su versión personal en multitud de hogares, y el ciudadano medio va conociendo en creciente proporción, además de su existencia, su modo de uso y buena parte de sus posibilidades.

Pero dejando de lado esta verdadera revolución social, existen otros conceptos procedentes del desarrollo tecnológico que han superado las barreras impuestas por las industrias y centros de investigación, incorporándose en cierta medida al lenguaje coloquial. Es llamativo como entre éstas destaca el concepto **robot**.

Pero el **robot industrial**, que se conoce y emplea en nuestros días, no surge como



consecuencia de la tendencia o afición de reproducir seres vivientes, sino de la necesidad. Fue la necesidad la que dio origen a la agricultura, el pastoreo, la caza, la pesca, etc. Más adelante, la necesidad provoca la primera revolución industrial con el descubrimiento de la máquina de vapor de Watt y, actualmente, la necesidad ha cubierto de ordenadores la faz de la tierra.

Inmersos en la era de la informatización, la imperiosa necesidad de aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos, ha hecho insuficiente la automatización industrial rígida, dominante en las primeras décadas del siglo XX, que estaba destinada a la fabricación de grandes series de una restringida gama de productos. Hoy día, más de la mitad de los productos que se fabrican corresponden a lotes de pocas unidades.

Al enfocarse la producción industrial moderna hacia la automatización global y flexible, han quedado en desuso las herramientas, que hasta hace poco eran habituales:

- Forja, prensa y fundición
- Esmaltado
- Corte
- Encolado
- Desbardado
- Pulido.

Finalmente, el resto de los robots instalados en 1979 se dedicaban al montaje y labores de inspección. En dicho año, la industria del automóvil ocupaba el 58% del parque mundial, siguiendo en importancia las empresas constructoras de maquinaria eléctrica y electrónica. En 1997 el parque mundial de robots alcanzó la cifra de aproximadamente 830.000 unidades, de los cuales la mitad se localizaba en Japón.

❖ Tipos de robot

Desde un punto de vista muy general los robots pueden ser de los siguientes tipos:

Androides

Una visión ampliamente compartida es que todos los robots son "androides". Los androides son artilugios que se parecen y actúan como seres humanos. Los robots de hoy en día vienen en todas las formas y tamaños, pero a excepción de los robots que aparecen en las ferias y espectáculos, no se parecen a las personas y por tanto no son androides. Actualmente, los androides reales sólo existen en la imaginación y en las películas de ficción.



Móviles

Los robots móviles están provistos de patas, ruedas u orugas que los capacitan para desplazarse de acuerdo a su programación. Elaboran la información que reciben a través de sus propios sistemas de sensores y se emplean en determinado tipo de instalaciones industriales, sobre todo para el transporte de mercancías en cadenas de producción y almacenes. También se utilizan robots de este tipo para la investigación en lugares de difícil acceso o muy distantes, como es el caso de la exploración espacial y de las investigaciones o rescates submarinos.



Industriales

Los **robots industriales** son artilugios mecánicos y electrónicos destinados a realizar de forma automática determinados procesos de fabricación o manipulación.

También reciben el nombre de robots algunos electrodomésticos capaces de realizar varias operaciones distintas de forma simultánea o consecutiva, sin necesidad de intervención humana, como los también llamados «procesadores», que trocean los alimentos y los someten a las oportunas operaciones de cocción hasta elaborar un plato completo a partir de la simple introducción de los productos básicos.

Los robots industriales, en la actualidad, son con mucho los más frecuentemente encontrados. Japón y Estados Unidos lideran la fabricación y consumo de robots industriales siendo Japón el número uno. Es curioso ver cómo estos dos países han definido al robot industrial:



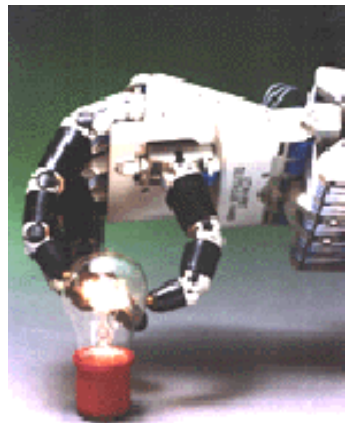
- La Asociación Japonesa de Robótica Industrial (JIRA): Los robots son "dispositivos capaces de moverse de modo flexible análogo al que poseen los organismos vivos, con o sin funciones intelectuales, permitiendo operaciones en respuesta a las órdenes humanas".
- El Instituto de Robótica de América (RIA): Un robot industrial es "un manipulador multifuncional y reprogramable diseñado para desplazar materiales, componentes, herramientas o dispositivos especializados por medio de movimientos programados variables con el fin de realizar tareas diversas".

La definición japonesa es muy amplia, mientras que la definición americana es más concreta. Por ejemplo, un robot manipulador que requiere un operador "mecánicamente enlazado" a él se considera como un robot en Japón, pero no encajaría en la definición americana. Asimismo, una máquina automática que no es programable entraría en la definición japonesa y no en la americana. Una ventaja de la amplia definición japonesa es que a muchos de los dispositivos automáticos cotidianos se les llama "robots" en Japón. Como resultado, los japoneses han aceptado al robot en su cultura mucho más fácilmente que los países occidentales, puesto que la definición americana es la que es internacionalmente aceptada.

Clasificación del robot industrial

La maquinaria para la automatización rígida dio paso al robot con el desarrollo de controladores rápidos, basados en el microprocesador, así como un empleo de servos en bucle cerrado, que permiten establecer con exactitud la posición real de los elementos del robot y establecer el error con la posición deseada. Esta evolución ha dado origen a una serie de tipos de robots, que se citan a continuación:

- Manipuladores
- Robots de repetición y aprendizaje
- Robots con control por ordenador
- Robots inteligentes
- Micro-robots



Manipuladores

Son sistemas mecánicos multifuncionales, con un sencillo sistema de control, que permite gobernar el movimiento de sus elementos, de los siguientes modos:

- **Manual:** Cuando el operario controla directamente la tarea del manipulador.
- **De secuencia fija:** cuando se repite, de forma invariable, el proceso de trabajo preparado previamente.
- **De secuencia variable:** Se pueden alterar algunas características de los ciclos de trabajo.

Existen muchas operaciones básicas que pueden ser realizadas óptimamente mediante manipuladores, por lo que se debe considerar seriamente el empleo de estos dispositivos, cuando las funciones de trabajo sean sencillas y repetitivas.



Robots de repetición o aprendizaje

Son manipuladores que se limitan a repetir una secuencia de movimientos, previamente ejecutada por un operador humano, haciendo uso de un controlador manual o un dispositivo auxiliar. En este tipo de robots, el operario en la fase de enseñanza, se vale de una pistola de programación con diversos pulsadores o teclas, o bien, de joysticks, o bien utiliza un maniquí, o a veces, desplaza directamente la mano del robot. Los robots de aprendizaje son los más conocidos, hoy día, en los ambientes industriales y el tipo de programación que incorporan, recibe el nombre de "gestual".



Robots con control por ordenador

Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales, controlados por un ordenador, que habitualmente suele ser un microordenador.

En este tipo de robots, el programador no necesita mover realmente el elemento de la máquina, cuando la prepara para realizar un trabajo. El control por ordenador dispone de un lenguaje específico, compuesto por varias instrucciones adaptadas al robot, con las que se puede confeccionar un programa de aplicación utilizando solo el terminal del ordenador, no el brazo. A esta programación se le denomina textual y se crea sin la intervención del manipulador.

Las grandes ventajas que ofrecen este tipo de robots, hacen que se vayan imponiendo en el mercado rápidamente, lo que exige la preparación urgente de personal cualificado, capaz de desarrollar programas similares a los de tipo informático.

Robots inteligentes

Son similares a los del grupo anterior, pero, además, son capaces de relacionarse con el mundo que les rodea a través de sensores y tomar decisiones en tiempo real (auto programable).

De momento, son muy poco conocidos en el mercado y se encuentran en fase experimental, en la que se esfuerzan los grupos investigadores por potenciarles y hacerles más efectivos, al mismo tiempo que más asequibles.

La visión artificial, el sonido de máquina y la inteligencia artificial, son las ciencias que más están estudiando para su aplicación en los robots inteligentes.

Micro robots

Con fines educacionales, de entretenimiento o investigación, existen numerosos robots de formación o micro-robots a un precio muy asequible y, cuya estructura y funcionamiento son similares a los de aplicación industrial.

Por último y con el fin de dar una visión del posible futuro, se presentan en forma clasificada, buena parte de los diversos tipos de robots que se puedan encontrar hoy en día. Todos los robots presentados existen en la actualidad, aunque los casos más futuristas están en estado de desarrollo en los centros de investigación de robótica.

	Clasificación de los robots según la AFRI
Tipo A	Manipulador con control manual o telemando.
Tipo B	Manipulador automático con ciclos preajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
Tipo C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
Tipo D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

(AFRI) Asociación Francesa de Robótica Industrial.

La IFR distingue entre cuatro tipos de robots:

1. Robot secuencial.
2. Robot de trayectoria controlable.
3. Robot adaptativo.
4. Robot tele manipulado.

Clasificación de los robots industriales en generaciones	
1ª Generación	Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.
2ª Generación	Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.
3ª Generación	Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee la capacidad para la planificación automática de sus tareas.

Clasificación de los robots según T. M. Knasel				
Generación	Nombre	Tipo de Control	Grado de movilidad	Usos más frecuentes
1 (1982)	<i>Pick & place</i>	Fines de carrera, aprendizaje	Ninguno	Manipulación, servicio de maquinas
2 (1984)	Servo	Servocontrol, trayectoria continua, progr. condicional	Desplazamiento por vía	Soldadura, pintura
3 (1989)	Ensamblado	Servos de precisión, visión, tacto,	Guiado por vía	Ensamblado, desbardado
4 (2000)	Móvil	Sensores inteligentes	Patas, ruedas	Construcción, mantenimiento
5 (2010)	Especiales	Controlados con técnicas de IA	Andante, saltarín	Militar, espacial

Médicos

Los robots médicos son, fundamentalmente, prótesis para disminuidos físicos que se adaptan al cuerpo y están dotados de potentes sistemas de mando. Con ellos se logra igualar con precisión los movimientos y funciones de los órganos o extremidades que suplen.



Teleoperadores

Hay muchos "parientes de los robots" que no encajan exactamente en la definición precisa. Un ejemplo son los teleoperadores. Dependiendo de cómo se defina un robot, los teleoperadores pueden o no clasificarse como robots. Los teleoperadores se controlan remotamente por un operador humano. Cuando pueden ser considerados robots se les llama "telerobots". Cualquiera que sea su clase, los teleoperadores son generalmente muy sofisticados y extremadamente útiles en entornos peligrosos tales como residuos químicos y desactivación de bombas.

Se puede concretar más, atendiendo a la **arquitectura de los robots**. La arquitectura, definida por el tipo de configuración general del robot, puede ser metamórfica. El concepto de **metamorfismo**, de reciente aparición, se ha introducido para incrementar la flexibilidad funcional de un robot a través del cambio de su configuración por el propio robot. El metamorfismo admite diversos niveles, desde los más elementales -cambio de herramienta o de efector terminal-, hasta los más complejos como el cambio o alteración de algunos de sus elementos o subsistemas estructurales.

Los dispositivos y mecanismos que pueden agruparse bajo la denominación genérica del robot, tal como se ha indicado, son muy diversos y es por tanto difícil establecer una clasificación coherente de los mismos que resista un análisis crítico y riguroso. La subdivisión de los robots, con base en su arquitectura, se hace en los siguientes grupos: Poliarticulados, Móviles, Androides, Zoomórficos e Híbridos.

Poliarticulados

Bajo este grupo están los robots de muy diversa forma y configuración cuya característica común es la de ser básicamente sedentarios -aunque excepcionalmente pueden ser guiados para efectuar desplazamientos limitados- y estar estructurados para mover sus elementos terminales en un determinado espacio de trabajo según uno o más sistemas de coordenadas y con un número limitado de grados de libertad. En este grupo se encuentran los manipuladores y algunos robots industriales, y se emplean cuando es preciso abarcar una zona de trabajo relativamente amplia o alargada, actuar sobre objetos con un plano de simetría vertical o reducir el espacio ocupado en la base.

Móviles

Cuentan con gran capacidad de desplazamiento, basados en carros o plataformas y dotados de un sistema locomotor de tipo rodante. Siguen su camino por telemando o guiándose por la información recibida de su entorno a través de sus sensores. Las tortugas motorizadas diseñadas en los años cincuenta, fueron las precursoras y sirvieron de base a los estudios sobre inteligencia artificial desarrollados entre 1965 y 1973 en la Universidad de Stanford.

Estos robots aseguran el transporte de piezas de un punto a otro de una cadena de fabricación. Guiados mediante pistas materializadas a través de la radiación electromagnética de circuitos empotrados en el suelo, o a través de bandas detectadas fotoeléctricamente, pueden incluso llegar a sortear obstáculos y están dotados de un nivel relativamente elevado de inteligencia.



Androides

Estos intentan reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento cinemático del ser humano. Actualmente los androides son todavía dispositivos muy poco evolucionados y sin utilidad práctica, y destinados, fundamentalmente, al estudio y experimentación.

Uno de los aspectos más complejos de estos robots, y sobre el que se centra la mayoría de los trabajos, es el de la locomoción bípeda. En este caso, el principal problema es controlar dinámicamente y coordinadamente en el tiempo real el proceso y mantener simultáneamente el equilibrio del robot.

Zoomórficos

Los robots zoomórficos, que considerados en sentido no restrictivo podrían incluir también a los androides, constituyen una clase caracterizada principalmente por sus sistemas de locomoción que imitan a los diversos seres vivos.

A pesar de la disparidad morfológica de sus posibles sistemas de locomoción es conveniente agrupar a los robots zoomórficos en dos categorías principales: caminadores y no caminadores. El grupo de los robots zoomórficos no caminadores está muy poco evolucionado. Cabe destacar, entre otros, los experimentados efectuados en Japón basados en segmentos cilíndricos biselados acoplados axialmente entre sí y dotados de un movimiento relativo de rotación. En cambio, los robots zoomórficos caminadores multípedos son muy numerosos y están siendo experimentados en diversos laboratorios con vistas al desarrollo posterior de verdaderos vehículos terrenos, pilotados o autónomos, capaces de evolucionar en superficies muy accidentadas. Las aplicaciones de estos robots serán interesantes en el campo de la exploración espacial y en el estudio de los volcanes.

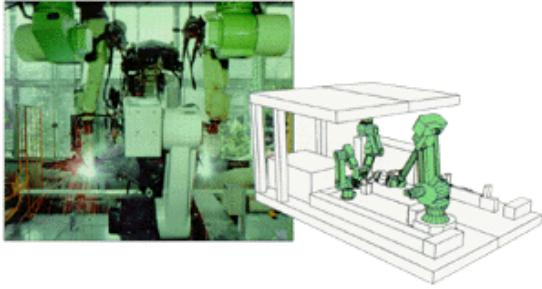


Híbridos

Estos robots corresponden a aquellos de difícil clasificación cuya estructura se sitúa en combinación con alguna de las anteriores ya expuestas, bien sea por conjunción o por yuxtaposición. Por ejemplo, un dispositivo segmentado, articulado y con ruedas, tiene al mismo tiempo uno de los atributos de los robots móviles y de los robots zoomórficos.

De igual forma pueden considerarse híbridos algunos robots formados por la yuxtaposición de un cuerpo formado por un carro móvil y de un brazo semejante al de los robots industriales. En parecida situación se encuentran algunos robots antropomorfos y que no pueden clasificarse ni como móviles ni como androides, tal es el caso de los robots personales.

❖ Impacto de la robótica



La Robótica es una nueva tecnología, que surgió como tal, hacia 1960. Han transcurrido pocos años y el interés que ha despertado, desborda cualquier previsión. Quizás, al nacer la Robótica en la era de la información, una propaganda desmedida ha propiciado una imagen irreal a nivel popular y, al igual que sucede con el microprocesador, la mitificación de esta nueva máquina, que de todas formas, nunca dejara de ser eso, una máquina.

Impacto en la Educación

El auge de la Robótica y la imperiosa necesidad de su implantación en numerosas instalaciones industriales, requiere el concurso de un buen número de especialistas en la materia. La Robótica es una tecnología multidisciplinar. Hace uso de todos los recursos de vanguardia de otras ciencias afines, que soportan una parcela de su estructura. Destacan las siguientes:

- Mecánica
- Cinemática
- Dinámica
- Matemáticas
- Automática
- Electrónica
- Informática
- Energía y actuadores eléctricos, neumáticos e hidráulicos
- Visión artificial
- Sonido de máquinas
- Inteligencia artificial.

Realmente la **Robótica** es una combinación de todas las disciplinas expuestas, más el conocimiento de la aplicación a la que se enfoca, por lo que su estudio se hace especialmente indicado en las carreras de Ingeniería Superior y Técnica y en los centros de formación profesional, como asignatura práctica. También es muy recomendable su estudio en las facultades de informática en las vertientes dedicadas al procesamiento de imágenes, inteligencia artificial, lenguajes de robótica, programación de tareas, etc.

Finalmente, la Robótica brinda a investigadores y doctorados un vasto y variado campo de trabajo, lleno de objetivos y en estado inicial de desarrollo.

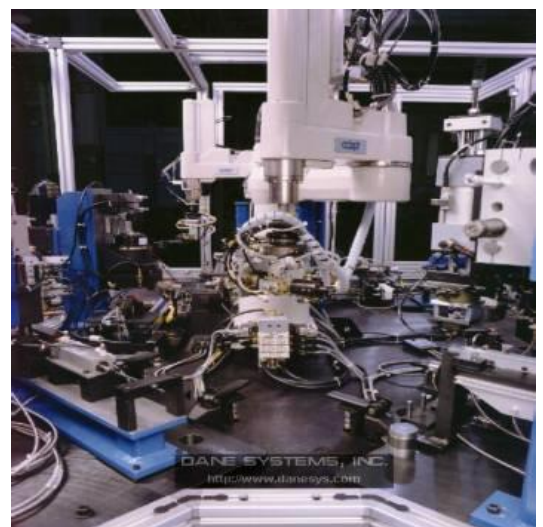
La abundante oferta de robots educacionales en el mercado y sus precios competitivos, permiten a los centros de enseñanza complementar un estudio teórico de la Robótica, con las prácticas y ejercicios de experimentación e investigación adecuados.

Una formación en robótica localizada exclusivamente en el control no es la más útil para la mayoría de los estudiantes, que de trabajar con robots lo harán como usuarios y no como fabricantes. Sin embargo, no hay que perder de vista que se está formando a ingenieros, y que hay que proveerles de los medios adecuados para abordar, de la manera más adecuada, los problemas que puedan surgir en el desarrollo de su profesión.

Impacto en la automatización industrial

El concepto que existía sobre **automatización industrial** se ha modificado profundamente con la incorporación al mundo del trabajo del robot, que introduce el nuevo vocablo de "sistema de fabricación flexible", cuya principal característica consiste en la facilidad de adaptación de este núcleo de trabajo, a tareas diferentes de producción.

Las células flexibles de producción se ajustan a necesidades del mercado y están constituidas, básicamente, por grupos de robots, controlados por ordenador. Las células flexibles disminuyen el tiempo del ciclo de trabajo en el taller de un producto y liberan a las personas de trabajos desagradables y monótonos.



La interrelación de las diferentes células flexibles a través de potentes ordenadores, dará lugar a la factoría totalmente automatizada, de las que ya existen algunas experiencias.

Impacto en la competitividad

La adopción de la automatización parcial y global de la fabricación, por parte de las poderosas compañías multinacionales, obliga a todas las demás a seguir sus pasos para mantener su supervivencia.

Cuando el grado de utilización de maquinaria sofisticada es pequeño, la inversión no queda justificada. Para poder compaginar la reducción del número de horas de trabajo de los operarios y sus deseos para que estén emplazadas en el horario normal diurno, con el empleo intensivo de los modernos sistemas de producción, es preciso utilizar nuevas técnicas de fabricación flexible integral.

Impacto sociolaboral

El mantenimiento de las empresas y el consiguiente aumento en su productividad, aglutinan el interés de empresarios y trabajadores en aceptar, por una parte la inversión económica y por otra la reducción de puestos de trabajo, para incorporar las nuevas tecnologías basadas en robots y ordenadores.

Las ventajas de los modernos elementos productivos, como la liberación del, hombre de trabajos peligrosos, desagradables o monótonos y el aumento de la productividad, calidad y competitividad, a menudo, queda eclipsado por el aspecto negativo que supone el desplazamiento de mano de obra, sobre todo en tiempos de crisis. Este temor resulta infundado si se analiza con detalle el verdadero efecto de la robotización.

En el caso de España en 1998 existían aproximadamente 5000 robots instalados, lo que supone la sustitución de 10000 puestos de trabajo. El desempleo generado quedará completamente compensado por los nuevos puestos de trabajo que surgirán en el sector de la enseñanza, los servicios, la instalación, mantenimiento y fabricación de robots, pero especialmente por todos aquellos que se mantendrán, como consecuencia de la revitalización y salvación de las empresas que implanten los robots.

❖ ¿Qué esperamos?

En las historias de robots de Isaac Asimov, éste prevé un mundo futuro en el que existen reglas de seguridad para que los robots no puedan ser dañinos para los seres humanos. Por tal razón Asimov propuso las siguientes tres **leyes de la robótica**:

1ª.- Un robot no puede dañar a un ser humano o, a través de la inacción, permitir que se dañe a un ser humano.

2ª.- Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, excepto cuando tales órdenes estén en contra de la primera ley.

3ª.- Un robot debe proteger su propia existencia siempre y cuando esta protección no entre en conflicto con la primera y segunda ley.

Sin llegar a la ciencia-ficción, por ahora nos gustaría que los robots tuvieran las siguientes características:

- **Autónomos**, que pudiesen desarrollar su tarea de forma independiente.
- **Fiables**, que siempre realizasen su tarea de la forma esperada.
- **Versátiles**, que pudiesen ser utilizados para varias tareas sin necesidad de modificaciones en su control.

2. Origen y desarrollo de la robótica

❖ Antecedentes históricos. Eras Tecnológicas

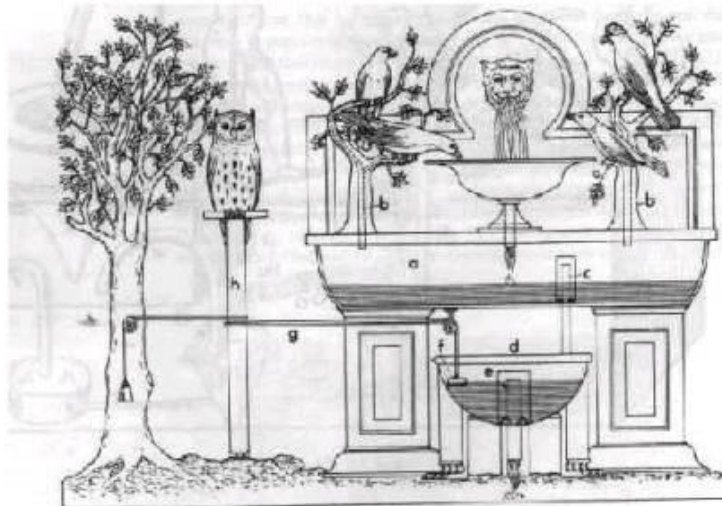
La historia de la tecnología está formada por tres períodos principales: era agrícola, era industrial y era de la información. El desarrollo de los robots se puede ver como lógica e importante parte de la historia.

Eras Agrícola e Industrial

A través de la historia la tecnología de cada época ha sido poderosamente influyente en la vida cotidiana de sus sociedades. Los productos y la ocupación han sido dictados por la tecnología disponible, por ejemplo en la era agrícola cuya tecnología era muy primitiva, esta estaba formada por herramientas muy simples que, sin embargo eran lo último en tecnología, como consecuencia de ello la mayoría de la gente eran agricultores y todo el trabajo se hacía mediante la fuerza de los hombres y de los animales.

- **Grecia:** *Automatos* (autómata)

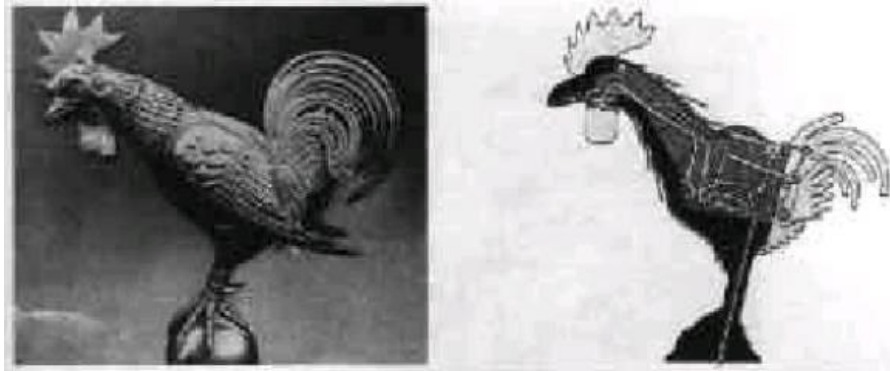
- Herón de Alejandría (85 d. C.) (fuente de pájaros cantores)



- **Arabia** Utilidad práctica de mecanismos
- **Edad Media**

- Hombre de hierro de Alberto Magno (1204- 1282)

– Gallo de Estrasburgo (1352)



- **Renacimiento**

– León Mecánico de Leonardo da Vinci (1499)

– Hombre de Palo de Juanelo Turriano (1525)

- **Siglos XVII- XIX**

– Muñecos (flautista) de Jacques Vaucanson (1738)

– Escriba, organista, dibujante de familia Droz (1770)

– Muñeca dibujante de Henry Maillardet



A mediados del siglo XVIII, los molinos de agua, la máquina de vapor y otros transformadores de energía reemplazaron la fuerza humana y animal como fuente

principal de energía. Las nuevas máquinas de fabricación impulsaron el crecimiento de la industria y mucha gente pasó a estar empleada en las nuevas fábricas como trabajadores. Los bienes se producían más rápidamente y mejor que antes y la calidad de vida aumentó. Los cambios se sucedieron tan deprisa que a este período se le conoce como "Revolución Industrial".

Era de la Información

A continuación, en la mitad del siglo XX surgen las industrias basadas en la ciencia, las mejoras tecnológicas en la electrónica hicieron posible el ordenador. Este constituye el desarrollo más importante, el ordenador revolucionó el modo de procesar y comunicar la información. Como resultado la información se ha convertido en un bien más del mercado y esta nueva era se conoce como la era de la información o "post-industrial".

La tecnología de la información tiene un gran impacto en la sociedad, ordenadores, fibra óptica, radio, televisión y satélites de comunicación son sólo ejemplos de dispositivos que tienen un enorme efecto sobre nuestra vida y economía.

Un gran porcentaje de empleos requieren "trabajadores informáticos" y cada vez menos se necesitan "trabajadores de producción". La tecnología de la información ha sido responsable del espectacular crecimiento de la Robótica, y a medida que la era industrial declina se espera que cada vez más trabajo físico sea realizado por robots.

❖ **¿Cuándo aparecen los robots tal y como los conocemos en la actualidad?**

Androides que posean una funcionalidad completa se encuentran muy alejados de la actualidad debido a la multitud de problemas que aún deben ser resueltos. Sin embargo, algunos robots reales sofisticados que trabajan hoy en día están revolucionando los lugares de trabajo. Estos robots no tienen la romántica apariencia humana de los androides, de hecho son manipuladores (brazos y manos) industriales controlados por ordenador; son tan diferentes a la imagen popular que sería muy fácil no reconocerlos.

Con el objetivo de diseñar una máquina flexible, adaptable al entorno y de fácil manejo, George Devol, pionero de la Robótica Industrial, patentó en 1948, un manipulador programable que fue el germen del robot industrial. En 1948 R.C. Goertz del Argonne National Laboratory, desarrolló, con el objetivo de manipular elementos radioactivos sin riesgo para el operador, la primera tele manipuladora. Éste consistía en un dispositivo mecánico maestro-esclavo. El manipulador maestro, reproducía fielmente los movimientos de este. El operador además de poder observar a través de un grueso cristal el resultado de sus acciones, sentía a través del dispositivo maestro, las fuerzas que el esclavo ejercía sobre el entorno.



Telemanipuladores de Goertz. Argonne National Laboratory (1948)

Años más tarde, en 1954, Goertz hizo uso de la tecnología electrónica y del servocontrol sustituyendo la transmisión mecánica por eléctrica y desarrollando así la primera tele manipuladora con servocontrol bilateral. Otro de los pioneros de la tele manipulación fue Ralph Mosher, ingeniero de la General Electric que en 1958 desarrolló un dispositivo denominado Handy-Man, consistente en dos brazos mecánicos teleoperados mediante un maestro del tipo denominado exoesqueleto. Junto a la industria nuclear, a lo largo de los años sesenta la industria submarina comenzó a interesarse por el uso de las teles manipuladores.

A este interés se sumó la industria espacial en los años setenta. La evolución de las teles manipuladoras a lo largo de los últimos años no ha sido tan espectacular como la de los robots. Recluidos en un mercado selecto y limitado (industria nuclear, militar, espacial, etc.) son en general desconocidos y comparativamente poco atendidos por los investigadores y usuarios de robots. Por su propia concepción, un tele manipulador precisa el mando continuo de un operador, y salvo por las aportaciones incorporadas con el concepto del control supervisado y la mejora de la tele presencia promovida hoy día por la realidad virtual, sus capacidades no han variado mucho respecto a las de sus orígenes.

La sustitución del operador por un programa de ordenador que controlase los movimientos del manipulador dio paso al concepto de robot. La primera patente de un dispositivo robótico fue solicitada en marzo de 1954 por el inventor británico C.W. Kenward. Dicha patente fue emitida en el Reino Unido en 1957, sin embargo fue George C. Devol, ingeniero norteamericano, inventor y autor de varias patentes, el que estableció las bases del robot industrial moderno. En 1954 Devol concibió la idea de un dispositivo de transferencia de artículos programada que se patentó en Estados Unidos en 1961.

En 1956 Joseph F. Engelberger es director de ingeniería de la división aeroespacial de la empresa Manning Maxwell y Moore en Stanford, Connecticut. Juntos Devol y Engelberger comenzaron a trabajar en la utilización industrial de sus máquinas, fundando la Consolidated Controls Corporation, que más tarde se convierte en Unimation (Universal Automation), e instalando su primera máquina Unimate (1960), en la fábrica de General Motors de Trenton, Nueva Jersey, en una aplicación de fundición por inyección. Devol predijo que el robot industrial "ayudaría al trabajador de las fábricas del mismo modo en que las máquinas de ofimática habían ayudado al oficinista". Se produjo un *boom* de la idea de la fábrica del futuro, aunque en un primer intento el resultado y la viabilidad económica fueron desastrosos.



Devol- Engelberger fundan Unimation (1956). Primer robot industrial



Handy-man de Moshier (General Electric 1958)

Otras grandes empresas como AMF, emprendieron la construcción de máquinas similares (Versatran- 1963).

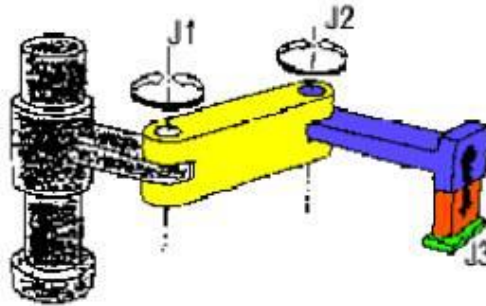
En 1968 J.F. Engelberger visitó Japón y poco más tarde se firmaron acuerdos con Kawasaki para la construcción de robots tipo Unimate. El crecimiento de la robótica en Japón aventaja en breve a los Estados Unidos gracias a Nissan, que formó la primera asociación robótica del mundo, la Asociación de Robótica industrial de Japón (JIRA) en 1972. Dos años más tarde se formó el Instituto de Robótica de América (RIA), que en 1984 cambió su nombre por el de Asociación de Industrias Robóticas, manteniendo las mismas siglas (RIA).

Por su parte Europa tuvo un despertar más tardío. En 1973 la firma sueca ASEA construyó el primer robot con accionamiento totalmente eléctrico. En 1980 se fundó la Federación Internacional de Robótica con sede en Estocolmo, Suecia.



Primer robot con accionamiento eléctrico: IRb6 ASEA (1973)

La configuración de los primeros robots respondía a las denominadas configuraciones esférica y antropomórfica, de uso especialmente válido para la manipulación. En 1982, el profesor Makino de la Universidad Yamanashi de Japón, desarrolla el concepto de robot SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) que busca un robot con un número reducido en grados de libertad (3 o 4), un coste limitado y una configuración orientada al ensamblado de piezas.



Robot SCARA del Prof. Makino (Univ. Yamanashi de Japón- 1982)

La definición del **robot industrial**, como una máquina que puede efectuar un número diverso de trabajos, automáticamente, mediante la programación previa, no es válida, puesto que existen bastantes máquinas de control numérico que cumplen esos requisitos. Una peculiaridad de los robots es su estructura de brazo mecánico y otra su adaptabilidad a diferentes aprehensores o herramientas. Otra característica específica del robot, es la posibilidad de llevar a cabo trabajos completamente diferentes e, incluso, tomar decisiones según la información procedente del mundo exterior, mediante el adecuado programa operativo en su sistema informático.



Se pueden distinguir cinco **fases relevantes en el desarrollo de la Robótica Industrial**:

1. El laboratorio ARGONNE diseña, en 1950, manipuladores amo-esclavo para manejar material radioactivo.
2. Unimation, fundada en 1958 por Engelberger, y hoy absorbida por Whestinghouse, realiza los primeros proyectos de robots a principios de la década de los sesenta de nuestro siglo, instalando el primero en 1961 y posteriormente, en 1967, un conjunto de ellos en una factoría de General Motors. Tres años después, se inicia la implantación de los robots en Europa, especialmente en el área de fabricación de automóviles. Japón comienza a implementar esta tecnología hasta 1968.
3. Los laboratorios de la Universidad de Stanford y del MIT acometen, en 1970, la tarea de controlar un robot mediante ordenador.
4. En el año de 1975, la aplicación del microprocesador, transforma la imagen y las características del robot, hasta entonces grande y costoso.
5. A partir de 1980, el fuerte impulso en la investigación, por parte de las empresas fabricantes de robots, otros auxiliares y diversos departamentos de Universidades de todo el mundo, sobre la informática aplicada y la experimentación de los sensores, cada vez más perfeccionados, potencian la configuración del robot inteligente capaz de adaptarse al ambiente y tomar decisiones en tiempo real, adecuarlas para cada situación.

En esta fase que dura desde 1975 hasta 1980, la conjunción de los efectos de la revolución de la Microelectrónica y la revitalización de las empresas automovilísticas, produjo un crecimiento acumulativo del parque de robots, cercano al 25%.

La evolución de los robots industriales desde sus principios ha sido vertiginosa. En poco más de 30 años las investigaciones y desarrollos sobre robótica industrial han permitido que los robots tomen posiciones en casi todas las áreas productivas y tipos de industria. En pequeñas o grandes fábricas, los robots pueden sustituir al hombre en aquellas áreas repetitivas y hostiles, adaptándose inmediatamente a los cambios de producción solicitados por la demanda variable.

Desde 1980, los robots se han expandido por varios tipos de industrias. El principal factor responsable de este crecimiento han sido las mejoras técnicas en los robots debidas al avance en Microelectrónica e Informática. Los Estados Unidos vendieron sus empresas de robots a Europa y Japón o a sus filiales en otros países. En la actualidad sólo una empresa, Adept, permanece en el mercado de producción industrial de robots en EE.UU.

Aunque los robots ocasionen cierto desempleo, también crean puestos de trabajo: Técnicos, comerciales, ingenieros, programadores, etc. Los países que usen eficazmente los robots en sus industrias tendrán una ventaja económica en el mercado mundial.

En el campo de la investigación el primer autómatas (1940,s) lo construye Grey Walter, era una tortuga que buscaba la luz o iba a enchufarse para recargar baterías, también de esa época es la bestia de John Hopkins. Al final de los 60,s Shakey construido por SRI navegaba en entornos de interior de edificios muy estructurados, y al final de los 70,s el Stanford Cart de Moravec se atrevió a salir a 'exteriores'. A partir de ese momento ha habido una gran proliferación de trabajo en vehículos autónomos que ya circulan a la velocidad de un coche por la carretera y navegan por todo terreno en aplicaciones comerciales.

❖ Generaciones

La introducción de los microprocesadores desde los años 70 ha hecho posible que la tecnología de los robots haya sufrido grandes avances, los modernos ordenadores han ofrecido un "cerebro" a los músculos de los robots mecánicos. Ha sido esta fusión de electrónica y mecánica la que ha hecho posible al moderno robot, los japoneses han acuñado el término "mecatrónica" para describir esta fusión.

El año 1980 fue llamado "primer año de la era robótica" porque la producción de robots industriales aumentó ese año un 80 % respecto del año anterior.

Primera y Segunda Generación

Los cambios en Robótica se suceden tan deprisa que ya se ha pasado de unos robots relativamente primitivos a principios de los 70, a una segunda generación. La primera

generación de robots era reprogramable, de tipo brazo, dispositivos manipuladores que sólo podían memorizar movimientos repetitivos, asistidos por sensores internos que les ayudan a realizar sus movimientos con precisión. La segunda generación de robots entra en escena a finales de los 70, tienen sensores externos (tacto y visión por lo general) que dan al robot información (realimentación) del mundo exterior. Estos robots pueden hacer elecciones limitadas o tomar decisiones y reaccionar ante el entorno de trabajo, se les conoce como robots adaptativos.

Tercera Generación

La tercera generación acaba de surgir, está surgiendo en estos años, emplean la inteligencia artificial y hacen uso de los ordenadores tan avanzados de los que se puede disponer en la actualidad. Estos ordenadores no sólo trabajan con números, sino que también trabajan con los propios programas, hacen razonamientos lógicos y aprenden. La IA permite a los ordenadores resolver problema inteligentemente e interpretar información compleja procedente de avanzados sensores.

Tendencia Futuras

Durante años los robots han sido considerados útiles sólo si se empleaban como manipuladores industriales. Recientemente han irrumpido varios roles nuevos para los robots. A diferencia de los tradicionales robots fijos de manipulación y fabricación, estos nuevos robots móviles pueden realizar tareas en un gran número de entornos distintos. A estos robots no industriales se les conoce como **robots de servicio**.

Los robots de servicio proporcionan muchas funciones de utilidad, se emplean para el ocio, la educación, fines de bienestar personal y social. Por ejemplo, hay prototipos que recorren los pasillos de los hospitales y cárceles para servir alimentos, otros navegan en oficinas para repartir el correo a los empleados. Los robots de servicios son idealmente adecuados al trabajo en áreas demasiado peligrosas para la vida humana y a explorar lugares anteriormente prohibidos a los seres humanos. Han probado ser valiosos en situaciones de alto riesgo como en la desactivación de bombas y en entornos contaminados radioactiva y químicamente.

Este crecimiento revolucionario en el empleo de robots como dispositivos prácticos es un indicador de que los robots desempeñarán un importante papel en el futuro. Los robots del futuro podrán relevar al hombre en múltiples tipos de trabajo físico. Joseph Engelberg, padre de la robótica industrial, está investigando en una especie de robot mayordomo o sirviente doméstico. Se piensa que los robots están en ese momento crítico antes de la explosión del mercado, como lo estuvieron los PC,s en 1975. El campo de la robótica se desbordará cuando los robots sean de dominio público, esta revolución exigirá que la gente de la era de la información no sea "analfabeta robótica".

En palabras de Engelberg:"Robotics is a six billion dollars industry worldwide. ... Sometime between 2000 and 2010 service robots will exceed industrial robotics in worldwide sales volume." Transition Research Corporation, USA.

❖ Estado actual y perspectivas de la Robótica mundial

El mercado mundial

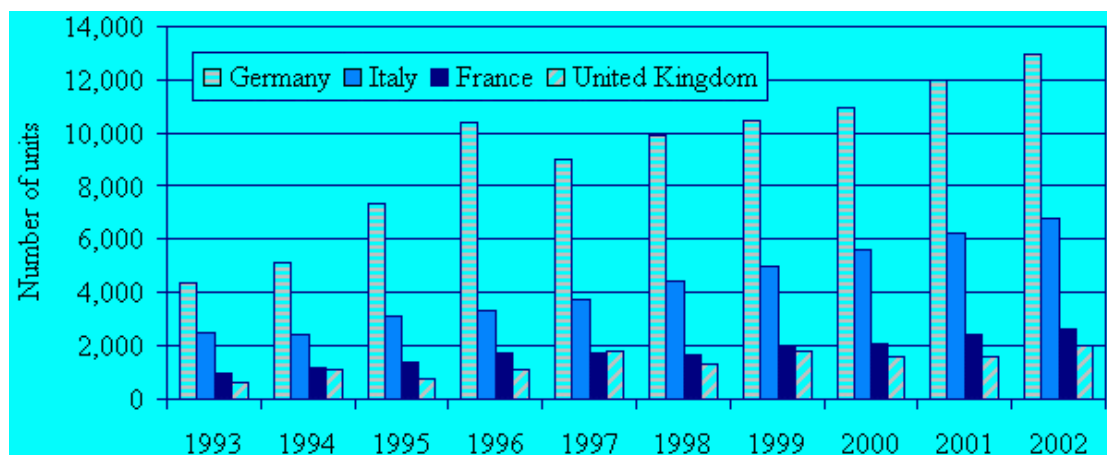
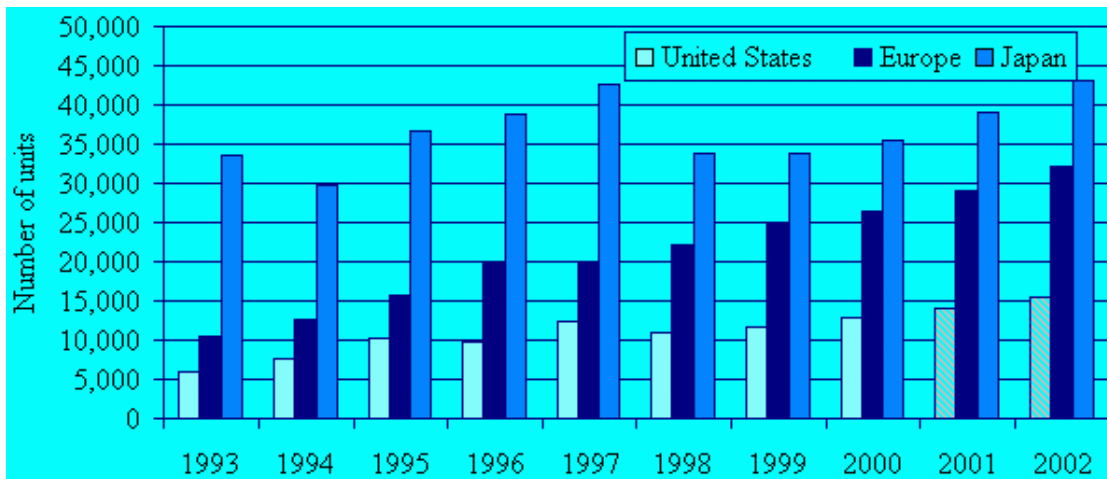
Las ventas mundiales de robots industriales alcanzaron un máximo en 1990, con más de 81.000 unidades. Siguió un retroceso entre 1991 y 1993; las ventas mundiales cayeron a aproximadamente 54.000 unidades en 1993. El mercado del robot mundial empezó entonces un período de recuperación que alcanzó el máximo en 1997, con un nivel de 85.000 unidades. En 1998, sin embargo, las ventas bajaron más de un 16%, cayendo a 71,000 unidades (véanse la tabla figura adjuntas).

Instalaciones anuales de robots industriales en 1997 y 1998, y proyecciones para 1999 y 2002 (número de unidades)

País	1997	1998	1999	2002	% cambio 98/97
Japón	42,696	33,796	33,800	43,000	-20.8
Estados Unidos	12,459	10,857	11,700	15,573	-12.9
Alemania	9,017	9,938	10,500	13,000	10.2
Italia	3,692	4,381	4,950	6,750	18.7
Francia	1,721	1,653	1,950	2,650	-4
Reino Unido	1,792	1,282	1,800	2,000	-28.5
Los seis Grandes	71,377	61,907	64,700	82,973	-13.3
Austria	250	250			
Bélgica	906	959			5.9
Dinamarca	130	215			65.4

Finlandia	220	378			71.8
Noruega	67	63			-6
España	1,203	1,810			50.5
Suecia	617	691			12
Suiza	289	357			23.5
Oeste de Europa-8	3,682	4,723	5,400	7,200	28.3
Europa Oriental	184	206	200	500	12
Australia	526	347			-34
Corea del sur	5,759	1,431			-75.2
Singapur	500	500			
Taiwán, la Provincia de China,	753	759			0.8
Asia-4	7,538	3,037	3,000	4,000	-59.7
Antigua URSS	1,000	500	1,000	1,000	-50
Otros países	1,300	800	800	1,200	-38.5
Total	85,081	71,173	75,100	96,873	-16.3
Fuentes: ONU / ECE, IFR					

Instalaciones anuales de robots industriales en 1993-1998, y proyecciones 1999-2002



El gran retroceso en las ventas entre 1990 y 1993/1994 era principalmente debido a la baja del suministro de robots de Japón, de 60.000 unidades a 30.000 unidades en 1994. La bajada de 1998 era resultado de la caída de ventas no sólo en Japón, sino también en la República de Corea. Las ventas en estos dos países bajaron un 21% y un 75%, respectivamente, comparado con el nivel de 1997 (tabla 1 y figura 1).

Cuando se excluye a Japón y la República de Corea, el mercado mundial restante muestra un aumento impresionante, del 16%, en 1998, en comparación con 1997. Esta saludable proporción de crecimiento también puede verse en proporciones de crecimiento del 21% en 1996 y del 35% en 1997 (la tasa de crecimiento correspondiente para el mercado mundial total era de sólo el 11% y el 7%, respectivamente).

Después de tres años de proporciones de crecimiento anuales del orden del 30%, el mercado en Estados Unidos cayó un 5% en 1996. En 1997, el mercado estaba recuperándose de nuevo, mostrándose un crecimiento de un 28% por encima de 1996, alcanzando un registro de 12.500 unidades. En 1998, sin embargo, las ventas cayeron un 13% por lo que se refiere a las unidades y un 7% por lo que se refiere al valor. Esto probablemente fue sólo un retroceso temporal, puesto que el mercado americano subió un 9% en la primera mitad de 1999, comparado con 1998.

El mercado del robot europeo aumentó un 10% en 1998, hasta aproximadamente las 22.000 unidades. Existe un aumento en la primera mitad de 1999 de un 32% por encima del mismo periodo de 1998, indicando que en 1999 se vería una ola continuada de inversiones en robots.

El crecimiento en 1998 estaba, sin embargo, bastante irregularmente distribuido entre los países. En los 8 países de Europa occidental, más pequeño, era del 28%. En España, Dinamarca y Finlandia, el crecimiento varió entre el 50% y el 70%. Entre los países más grandes, Alemania registró un crecimiento del 10% e Italia del 19%. Las ventas de Francia cayeron un 4% y un 29% en el Reino Unido.

Como se mencionó anteriormente, las ventas bajaron en Japón y la República de Corea. En Singapur, Tailandia y otros mercados asiáticos en los que existían condiciones previas favorables para la inversión en robótica han sufrido un paro, al menos, temporalmente. En Australia el mercado bajó un 34%.

En general, han aumentado las ventas anuales desde que los robots industriales empezaron a ser presentados a las industrias a finales de los años sesenta. Sin embargo, muchos de los primeros robots están ahora fuera de servicio. La cantidad de robots industriales en funcionamiento real es, por consiguiente, más baja. La IFR estima el número mundial de robots industriales operacionales al final de 1998 en 720.000 unidades, comparado con 700.000 unidades al final de 1997, lo que representa un aumento del 3%.

Japón se considera que cuenta con más de la mitad de los robots operacionales del mundo. Su proporción, sin embargo, está disminuyendo continuamente. En 1998, la operación de robots en Japón se desplomó en número absoluto.

Previsiones

El mercado mundial para los robots industriales se proyecta que aumente de 71.000 unidades en 1998 a 97.000 en 2002, o anualmente un promedio de un 8% (tabla 1 y figura 1). Estas proyecciones son revisando significativamente hacia abajo, como comparación a aquellos en el problema anterior. La Robótica mundial, principalmente debido al estancamiento proyectado en los mercados asiáticos.

Número de ventas mundiales	Unidades operativas a nivel mundial
1998: 71,000 unidades 2002: 97,000 unidades, +8% por año	1998: 720,000 unidades 2002: 800,000 unidades, +2.7% por año

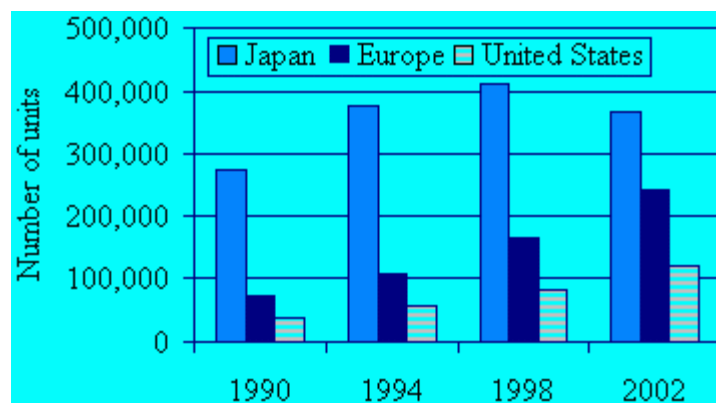
Las ventas en Japón continúan estando flojas pero se proyecta un crecimiento firme en Europa y América del Norte. Así, el número total de robots operativos continúa mostrando un aumento firme.

Número estimado de robots operativos en los años 1990, 1994 y 1998, y proyecciones para 2002

País	1990	1994	1998	2002	% cambio 98/97
Japón	274,200	377,000	411,800	366,600	-0.3
Estados Unidos	39,000	57,100	81,700	120,200	6
Alemania	27,300	45,300	73,200	103,800	9.5
Italia	12,200	20,600	31,500	47,400	11
Francia	8,400	12,300	16,200	20,000	3.7

ROBÓTICA

Reino Unido	5,900	8,100	10,800	15,000	8.1
Seis grandes	367,000	520,500	625,200	673,000	2.3
Austria	1,100	2,100	2,800		5.2
Bélgica	2,300	4,500	7,200		11.2
Dinamarca	500	600	1,000		20.5
Finlandia	800	1,200	1,900		17.8
Noruega	400	500	500		-2.1
España	2,100	4,200	8,600		23.4
Suecia	3,300	4,200	5,300		7.1
Suiza	1,500	2,500	3,300		8.7
Europa occidental - Europa-8	12,200	19,700	30,700	48,700	13.2
Europa oriental	7,500	2,600	2,700	4,100	-1.6
Australia	1,400	1,800	2,600		8.2
Corea del sur	3,000	12,700	31,400		4.1
Singapur	1,400	2,300	5,000		7.6
Taiwán	1,300	3,300	5,800		13.5
Asia-4	7,100	20,000	44,800	53,600	5.8
Antigua URSS	64,200	20,000	10,000	10,000	
Otros países	1,400	3,400	7,000	10,000	10.7
Total	459,400	586,100	720,400	799,400	3.0
Fuentes: ECE, IFR y asociaciones de robots nacionales					

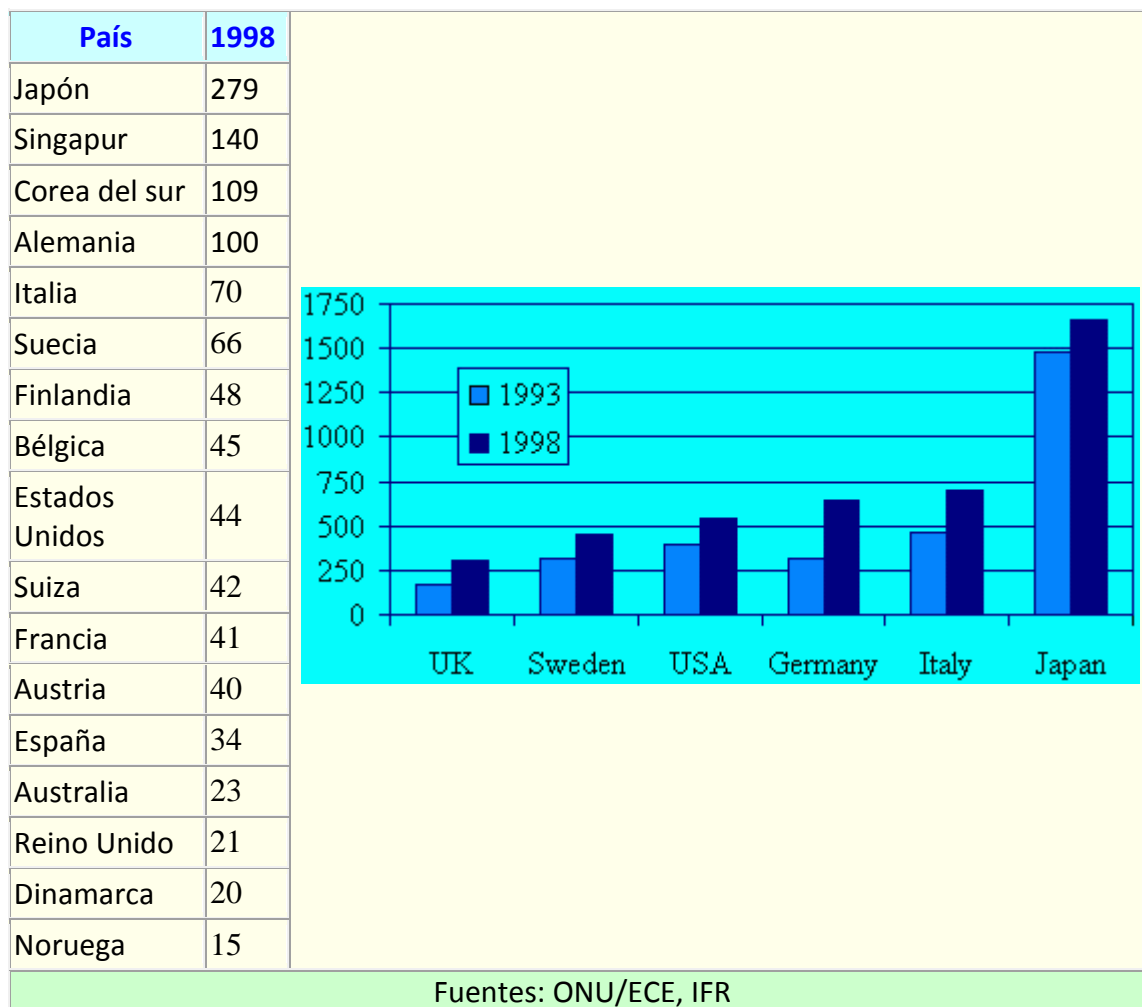


La densidad de robots está aumentando

La tabla adjunta muestra el número de robots por cada 10.000 personas empleadas en la industria. Pueden distinguirse cuatro grupos de países: el primer grupo contiene Japón, Singapur y la República de Corea, con densidades que van de aproximadamente

280 a 110. Estos números no son, sin embargo, comparables directamente a los de los otros países porque el último aplica una definición más estricta de robots.

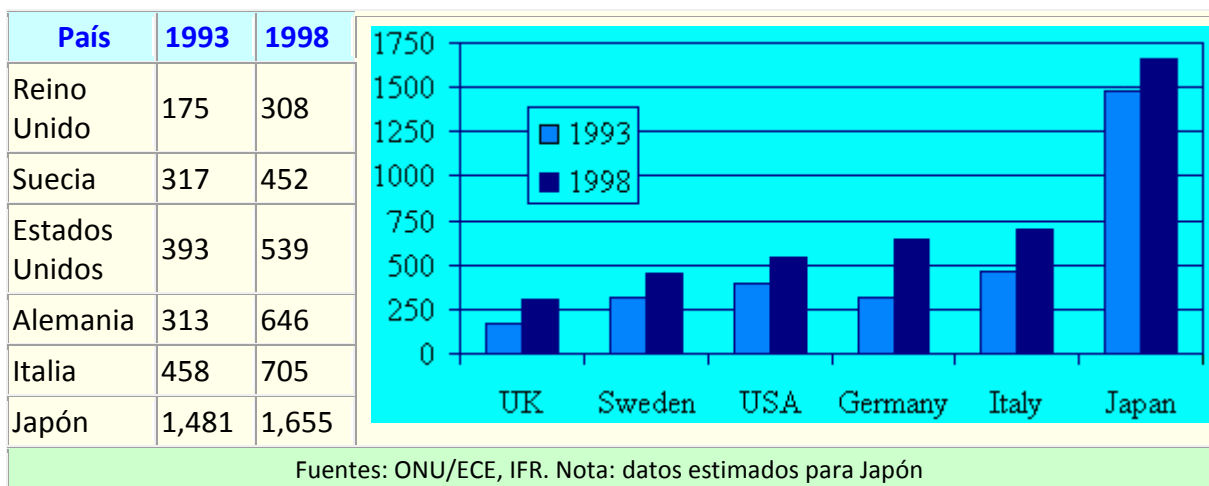
Número de robots por cada 10,000 personas empleadas en la industria, en 1998



Entre países que aplican una definición más restrictiva de robots industriales, Alemania está a la cabeza con 100 robots por cada 10.000 personas empleadas, seguida por Italia y Suecia con 70. En el tercer grupo de países, las densidades varían entre 50 y 40.

La siguiente tabla se muestra otra medida de densidad de robots: el número de robots por cada 10.000 obreros de producción en la industria del vehículo de motor. Aquí los números son de 5 a 10 veces superiores a las densidades anteriores, basadas en todas las personas empleadas en la industria.

Numero de robots por 10,000 obreros en la industria de automoción, de 1993 a 1998



En Japón se estima que en 1998 había un robot industrial para cada 6 obreros de producción en la industria del automóvil. En Italia había 14 obreros por cada robot y 19 en los Estados Unidos.

Los precios relativos de los robots están cayendo y su rentabilidad aumenta

Los precios nominales de robots están siguiendo una tendencia descendente. Además, al tener en cuenta las significativas mejoras en la actuación, los precios han caído más aún durante los años noventa. Esto implica que la rentabilidad de instalaciones de robots existentes está aumentando. A la larga (10-15 años) los precios parece que tendrán una tendencia a bajar.

Número de robots con 5 brazos o más, comparado con el número del total de robots instalado en 1998

País	Todos los robots	Los robots con ≥ 5 brazos	% proporción
Estados Unidos	10,857	9,607	88.5
Alemania	9,938	6,108	61.5
Italia	4,381	2,516	57.4
España	1,810	1,545	85.4
Francia	1,653	1,057	63.9
Reino Unido	1,282	871	67.9
Bélgica	959	671	70.0
Suecia	691	616	89.1
Australia	347	283	81.6
Finlandia	378	263	69.6

ROBÓTICA

Dinamarca	215	192	89.3
Austria	250	130	52.0
Taiwán,	759	108	14.2
Noruega	63	56	88.9
Polonia	53	40	75.5
Subtotal	33,636	24,063	71.5
Japón	33,796		
Corea del sur	1,431		
Otros países	2,310		
Total	71,173		
Fuentes: ONU / ECE, IFR			

Numero de robots de servicio para diversas áreas de aplicación, instalados al final de 1998 y estimados para el periodo 1999-2002.

Tipos de robots	Al final de 1998	Instalaciones 1999-2002
robots de limpieza: - limpieza de pisos - limpieza de tanques - limpieza de ventanas - otros (limpieza de aviones)	300	500
robots de alcantarilla (limpieza, inspección) robots trepadores de pared (limpieza, inspección) robots de inspección general (plantas de electricidad, sitios nucleares, puentes, etc.	200	200
robots subacuáticos: - inspección - robots por clase de trabajo	400	200
robots domésticos - limpieza de vacío (aspiradoras) - corte de césped - Otros	2,000	12,500
robots médicos - robots quirúrgicos - robots de asistencia quirúrgica - otros	800	7,000
Robots para personas discapacitadas; robots de asistencia; robots de silla de ruedas	200	200
Robots de correo	100	200
Robots de plataforma móvil (usos múltiples)	400	200

Robots de inspección; robots de seguridad	50	300
Robots guía (en museos)		100
Robots de abastecimiento de gasolinas	50	800
Robots contra bombas e incendios	150	400
Robots en la industria de la construcción robots en agricultura robots en hoteles y restaurantes robots en cuartos limpios robots de laboratorio robots espaciales robots para entretenimiento otros tipos	350	1,000
Número total de unidades, excluyendo robots aspiradora	5,000	23,600
Robots aspiradora		450,000
Valor estimado en millones de \$ US.	600	3,300

3. Robot industriales

❖ Definición del Robot Industrial



Existen ciertas dificultades a la hora de establecer una definición formal de lo que es un robot industrial. La primera de ellas surge de la diferencia conceptual entre el mercado japonés y el euro-americano de lo que es un robot y lo que es un manipulador. Así, mientras que para los japoneses un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico dotado de articulaciones móviles destinado a la manipulación, el mercado occidental es más restrictivo, exigiendo una mayor complejidad, sobre todo en lo relativo al control. En segundo lugar, y centrándose ya en el concepto occidental, aunque existe una idea común acerca de lo que es un robot industrial, no es fácil ponerse de acuerdo a la hora de establecer una definición formal. Además, la evolución de la robótica ha ido obligando a diferentes actualizaciones de su definición.

La definición más comúnmente aceptada posiblemente sea la de la Asociación de Industrias Robóticas (RIA), según la cual:

Un **robot industrial** es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

Esta definición, ligeramente modificada, ha sido adoptada por la Organización Internacional de Estándares (ISO) que define al robot industrial como:

Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas.

Se incluye en esta definición la necesidad de que el robot tenga varios grados de libertad. Una definición más completa es la establecida por la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR), que define primero el manipulador y, basándose en dicha definición, el robot:

- **Manipulador:** mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.
- **Robot:** manipulador automático servo-controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectoria variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material.

Por último, la Federación Internacional de Robótica (IFR) distingue entre robot industrial de manipulación y otros robots.

Por **robot industrial de manipulación** se entiende una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento.

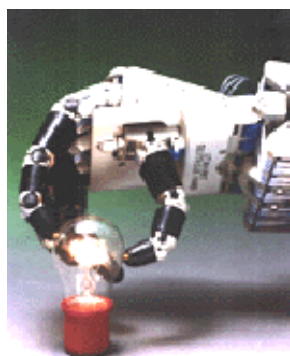
En esta definición se debe entender que la reprogramabilidad y la multifunción se consiguen sin modificaciones físicas del robot.

Común en todas las definiciones anteriores es la aceptación del robot industrial como un brazo mecánico con capacidad de manipulación y que incorpora un control más o menos complejo. Un sistema robotizado, en cambio, es un concepto más amplio. Engloba todos aquellos dispositivos que realizan tareas de forma automática en sustitución de un ser humano y que pueden incorporar o no a uno o varios robots, siendo esto último lo más frecuente.

❖ Clasificación del robot industrial

La maquinaria para la automatización rígida dio paso al robot con el desarrollo de controladores rápidos, basados en el microprocesador, así como un empleo de servos en bucle cerrado, que permiten establecer con exactitud la posición real de los elementos del robot y establecer el error con la posición deseada. Esta evolución ha dado origen a una serie de tipos de robots, que se citan a continuación:

- Manipuladores
- Robots de repetición y aprendizaje
- Robots con control por ordenador
- Robots inteligentes
- Micro-robots



Manipuladores

Son sistemas mecánicos multifuncionales, con un sencillo sistema de control, que permite gobernar el movimiento de sus elementos, de los siguientes modos:

- **Manual:** Cuando el operario controla directamente la tarea del manipulador.
- **De secuencia fija:** cuando se repite, de forma invariable, el proceso de trabajo preparado previamente.
- **De secuencia variable:** Se pueden alterar algunas características de los ciclos de trabajo.

Existen muchas operaciones básicas que pueden ser realizadas óptimamente mediante manipuladores, por lo que se debe considerar seriamente el empleo de estos dispositivos, cuando las funciones de trabajo sean sencillas y repetitivas.



Robots de repetición o aprendizaje

Son manipuladores que se limitan a repetir una secuencia de movimientos, previamente ejecutada por un operador humano, haciendo uso de un controlador manual o un dispositivo auxiliar. En este tipo de robots, el operario en la fase de enseñanza, se vale de una pistola de programación con diversos pulsadores o teclas, o bien, de joysticks, o bien utiliza un maniquí, o a veces, desplaza directamente la mano del robot. Los robots de aprendizaje son los más conocidos, hoy día, en los ambientes industriales y el tipo de programación que incorporan, recibe el nombre de "gestual".



Robots con control por ordenador

Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales, controlados por un ordenador, que habitualmente suele ser un microordenador.

En este tipo de robots, el programador no necesita mover realmente el elemento de la máquina, cuando la prepara para realizar un trabajo. El control por ordenador dispone de un lenguaje específico, compuesto por varias instrucciones adaptadas al robot, con las que se puede confeccionar un programa de aplicación utilizando solo el terminal del ordenador, no el brazo. A esta programación se le denomina textual y se crea sin la intervención del manipulador.

Las grandes ventajas que ofrecen este tipo de robots, hacen que se vayan imponiendo en el mercado rápidamente, lo que exige la preparación urgente de personal cualificado, capaz de desarrollar programas similares a los de tipo informático.

Robots inteligentes

Son similares a los del grupo anterior, pero, además, son capaces de relacionarse con el mundo que les rodea a través de sensores y tomar decisiones en tiempo real (auto programable).

De momento, son muy poco conocidos en el mercado y se encuentran en fase experimental, en la que se esfuerzan los grupos investigadores por potenciarles y hacerles más efectivos, al mismo tiempo que más asequibles.

La visión artificial, el sonido de máquina y la inteligencia artificial, son las ciencias que más están estudiando para su aplicación en los robots inteligentes.

Micro-robots

Con fines educacionales, de entretenimiento o investigación, existen numerosos robots de formación o micro-robots a un precio muy asequible y, cuya estructura y funcionamiento son similares a los de aplicación industrial.

Por último y con el fin de dar una visión del posible futuro, se presentan en forma clasificada, buena parte de los diversos tipos de robots que se puedan encontrar hoy en día. Todos los robots presentados existen en la actualidad, aunque los casos más futuristas están en estado de desarrollo en los centros de investigación de robótica.

Clasificación de los robots según la AFRI	
Tipo A	Manipulador con control manual o telemando.
Tipo B	Manipulador automático con ciclos preajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
Tipo C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
Tipo D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

(AFRI) Asociación Francesa de Robótica Industrial.

La IFR distingue entre cuatro tipos de robots:

1. Robot secuencial.
2. Robot de trayectoria controlable.
3. Robot adaptativo.
4. Robot tele manipulado.

Clasificación de los robots industriales en generaciones	
1ª Generación	Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.
2ª Generación	Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.
3ª Generación	Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee la capacidad para la planificación automática de sus tareas.

Clasificación de los robots según T. M. Knasel				
Generación	Nombre	Tipo de Control	Grado de movilidad	Usos más frecuentes
1 (1982)	<i>Pick & place</i>	Fines de carrera,	Ninguno	Manipulación, servicio de

		aprendizaje		maquinas
2 (1984)	Servo	Servocontrol, trayectoria continua, progr. condicional	Desplazamiento por vía	Soldadura, pintura
3 (1989)	Ensamblado	Servos de precisión, visión, tacto,	Guiado por vía	Ensamblado, desbardado
4 (2000)	Móvil	Sensores inteligentes	Patas, ruedas	Construcción, mantenimiento
5 (2010)	Especiales	Controlados con técnicas de IA	Andante, saltarín	Militar, espacial

4. Robots móviles. Diseño

A continuación se describen los pilares para el diseño mecánico de un robot móvil, para el que también se pueden tener en cuenta otros puntos de vista.

❖ Locomoción

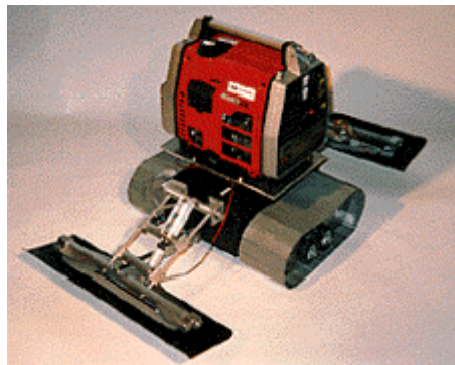
Existe una gran variedad de modos de moverse sobre una superficie sólida; entre los robots, las más comunes son las ruedas, las cadenas y las patas.

Los vehículos de ruedas son, con mucho, los más populares por varias razones prácticas. Los robots con ruedas son más sencillos y más fáciles de construir, la carga que pueden transportar es mayor, relativamente. Tanto los robots basados en cadenas como en patas se pueden considerar más complicados y pesados, generalmente, que los robots de ruedas para una misma carga útil. A esto podemos añadir el que se pueden transformar vehículos de ruedas de radio control para usarlos como bases de robots.



La principal desventaja de las ruedas es su empleo en terreno irregular, en el que se comportan bastante mal. Normalmente un vehículo de ruedas podrá sobrepasar un obstáculo que tenga una altura no superior al radio de sus ruedas, entonces una solución es utilizar ruedas mayores que los posibles obstáculos a superar; sin embargo, esta solución, a veces, puede no ser práctica.

Para robots que vayan a funcionar en un entorno natural las cadenas son una opción muy buena porque las cadenas permiten al robot superar obstáculos relativamente mayores y son menos susceptibles que las ruedas de sufrir daños por el entorno, como piedras o arena. El principal inconveniente de las cadenas es su ineficacia, puesto que se produce deslizamiento sobre el terreno al avanzar y al girar. Si la navegación se basa en el conocimiento del punto en que se encuentra el robot y el cálculo de posiciones futuras sin error, entonces las cadenas acumulan tal cantidad de error que hace inviable la navegación por este sistema. En mayor o menor medida cualquiera de los sistemas de locomoción contemplados aquí adolece de este problema.



Potencialmente los robots con patas pueden superar con mayor facilidad que los otros los problemas de los terrenos irregulares. A pesar de que hay un gran interés en diseñar este tipo de robots, su construcción plantea numerosos retos. Estos retos se originan principalmente en el gran número de grados de libertad que requieren los sistemas con patas. Cada pata necesita como mínimo un par de motores lo que produce un mayor coste, así como una mayor complejidad y menor fiabilidad. Es más los algoritmos de control se vuelven mucho más complicados por el gran número de movimientos a coordinar, los sistemas de patas son un área de investigación muy activo.

Diseño de ruedas

Existen varios diseños de ruedas para elegir cuando se quiere construir una plataforma móvil sobre ruedas: diferencial, sincronizada, triciclo y de coche.

Diferencial

Tanto desde el punto de vista de la programación como de la construcción, el diseño diferencial es uno de los menos complicados sistemas de locomoción. El robot puede ir recto, girar sobre sí mismo y trazar curvas.

Un problema importante es cómo resolver el equilibrio del robot, hay que buscarle un apoyo adicional a las dos ruedas ya existentes, esto se consigue mediante una o dos ruedas de apoyo añadidas en un diseño triangular o romboidal. El diseño triangular puede no ser suficiente dependiendo de la distribución de pesos del robot, y el romboidal puede provocar inadaptación al terreno si éste es irregular lo que puede exigir alguna clase de suspensión.

Otra consideración a hacer en este diseño es cómo conseguir que el robot se mueva recto, para que el robot se mueva en línea recta sus ruedas tienen que girar a la misma velocidad.

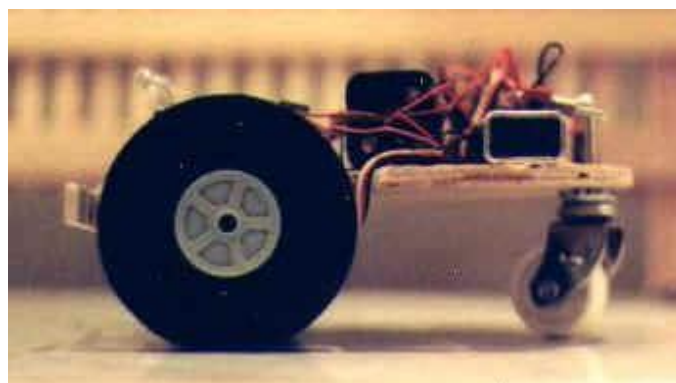
Cuando los motores encuentran diferentes resistencias (una rueda sobre moqueta y la otra sobre terrazo) las velocidades de los motores varían y el robot girará incluso aún cuando se le haya ajustado inicialmente para que vaya recto. Esto quiere decir que la velocidad debe ser controlada dinámicamente, o sea, debe existir un medio de monitorizar y cambiar la velocidad del motor mientras el robot avanza. De esta manera la simplicidad del diseño queda minimizada por la complejidad del sistema de control de la velocidad; no obstante la reducción de la complejidad mecánica en detrimento de la complejidad de la electrónica y del software es frecuentemente una elección más barata y fiable.

Diseño sincronizado

En este diseño todas las ruedas (generalmente tres) son tanto de dirección como motrices, las ruedas están enclavadas de tal forma que siempre apuntan en la misma dirección. Para cambiar de dirección el robot gira simultáneamente todas sus ruedas alrededor de un eje vertical, de modo que la dirección del robot cambia, pero su chasis sigue apuntando en la misma dirección que tenía. Si el robot tiene una parte delantera (es asimétrico) presumiblemente donde se concentran sus sensores, se tendrá que arbitrar un procedimiento para que su cuerpo se oriente en la misma dirección que sus ruedas. El diseño sincronizado supera muchas de las dificultades que plantean el diseño diferencial, en triciclo y de coche, pero a costa de una mayor complejidad mecánica.

Diseño de triciclo y coche

El diseño de coche con sus cuatro ruedas con suspensión proporciona una buena estabilidad, el diseño en triciclo tiene unas prestaciones similares con la ventaja de ser mecánicamente más simple ya que el coche necesita alguna unión entre las ruedas direccionables. En general en estos dos diseños las ruedas direccionables no son motrices, y no es necesario controlar la velocidad de las ruedas para que el robot se mantenga recto. Esta simplificación tiene su precio como veremos en el próximo apartado.



Locomoción por medio de patas

En general, los sistemas que emplean patas son bastante complejos, sin embargo hay variantes. Un sistema de patas tipo insecto se puede construir empleando sólo parejas de servos.

Para dar un paso un servo abre la pata alejándola del cuerpo para salvar si hay un obstáculo, luego el otro servo de la pareja gira para que la pata se mueva adelante. El primer servo, después, baja la pata hasta que ésta toque el suelo, finalmente el segundo servo gira hacia atrás empujando el cuerpo del robot adelante. El movimiento coordinado de seis patas permite al robot moverse adelante, atrás y girar.



Cinemática

La cinemática del robot trata de cómo se mueve el mismo, dado que la dirección adopta tal y tal ángulo y que cada rueda gira tantas veces, ¿dónde acabará el robot y qué camino tomará?

Los diseños diferencial y sincronizado tienen una ventaja sutil sobre los otros dos tipos, la diferencia estriba en sus cinemáticas. Considere un triciclo, el cual tiene tres grados de libertad cuando se mueve sobre una superficie plana. Es decir, en relación con un sistema global de coordenadas, el robot puede estar en cualquier posición especificado por dos coordenadas x e y , y apuntando en una dirección especificada por una tercera coordenada, el ángulo q . Estos tres grados de libertad (x, y, q) nos dan la distancia y el ángulo entre el sistema de coordenadas global, y una referencia local en el robot.

Nos gustaría tener la posibilidad de posicionar y orientar nuestro robot en cualquier lugar sobre el plano, es decir, sin considerar de donde arranca, si le damos x, y, q el robot debe poder moverse a esa posición. Sin embargo, hay un problema, para alcanzar esos tres grados de libertad el robot sólo puede controlar dos parámetros: la dirección, ángulo a , y la distancia total recorrida, S . Esto quiere decir que la orientación del robot y su posición están ligados, para girar tiene que moverse hacia delante o hacia atrás. El robot no puede ir directamente de una posición y/o orientación a otra, incluso aun cuando no haya nada en su camino. Para alcanzar una posición y orientación deseadas simultáneamente, el robot tiene que seguir algún camino, posiblemente complejo. Los detalles de ese camino se complican todavía más con la presencia de obstáculos, esta es la razón por la que el aparcamiento en línea es difícil; sin embargo, un robot basado en los diseños diferencial o sincronizado puede, al girar sobre sí mismo, desacoplar efectivamente su posición de su orientación.

Forma del robot

La forma de un robot puede tener un gran impacto en sus prestaciones, un robot no cilíndrico corre mayor riesgo de quedar atrapado por una disposición desfavorable de obstáculos o de fallar en encontrar un camino en un espacio estrecho o intrincado.

Consideremos dos robots del mismo tamaño uno cilíndrico y el otro cuadrado, ambos encuentran un paso estrecho según se mueven. Un algoritmo sencillo permitirá al robot cilíndrico pasar, el robot choca, gira y lo intenta de nuevo hasta que pasa. Esto es así de simple porque el robot es capaz de girar estando en contacto con el obstáculo.

El robot cuadrado, por el contrario, tiene que retroceder y girar si quiere usar la misma táctica. Por tanto, siempre se requiere un algoritmo más complejo para la navegación de un robot cuadrado que para la de uno cilíndrico. Para entender la razón de esto, tenemos que apelar a un concepto avanzado en robótica conocido como **espacio de configuraciones**.

❖ **Adaptación de plataformas móviles**

Hay una gran cantidad de plataformas móviles disponibles para adaptarlas como base de robots móviles: coches de radio-control, vehículos filodirigidos y otros juguetes de pilas. La mayoría de los sistemas de locomoción de ruedas excepto el sincronizado están bien representados en las tiendas de juguetes.

Es una buena elección escoger el sistema de locomoción y suspensión de un juguete como base de un robot móvil por varias razones. Lo primero es que nos exigirá menos esfuerzo de diseño y construcción ya que la mayor parte de estos problemas los habrá resuelto de antemano el fabricante, y lo segundo que resultará más barato que comprar los componentes por separado.

El diseñador del robot, sin embargo, debe tener presente que existen algunos problemas al hacer esto. Normalmente la plataforma no se adaptará directamente a su uso como robot. Los motores de los juguetes requieren más corriente y tienen poca eficacia, lo que significa que la electrónica será más complicada y el tiempo de funcionamiento será más corto.

Por lo general, los motores y engranajes de los juguetes se diseñan para hacer al juguete más rápido, por tanto, se producen problemas de control cuando el robot debe moverse despacio para responder a los sensores, también es complicado añadirles codificadores de eje. Lo ideal sería encontrar un modelo que tuviera un motor y transmisión independiente a cada rueda.

Los juguetes móviles más baratos tienen un solo motor y maniobran mediante una serie de movimientos adelante, atrás y giros. Cuando el motor gira en una dirección el juguete se mueve adelante, y cuando el motor gira al revés un embrague simple montado en el eje hace que sólo gire una de las ruedas y por tanto el juguete gira. Por tanto, el juguete sólo gira cuando va hacia atrás. Es posible realizar un robot que actúe de esa manera, aunque se puede quedar “pegado” cuando no puede ir hacia atrás. Los juguetes que llevan este sistema de movimiento se reconocen con facilidad porque su control remoto sólo tiene un botón. Cuando el juguete se enciende, anda solamente adelante y cuando se pulsa el botón gira al ir atrás.

Los juguetes que son más útiles tienen o transmisión con diferencial o cadenas o un motor de tracción separado del motor de direccionamiento.

Un modo de saber de qué tipo de mecanismo de transmisión posee un juguete es encenderlo y observar su comportamiento, si las ruedas cambian su velocidad relativa al girar es probable que el mecanismo de tracción sea de tipo diferencial, si el juguete tiene ruedas de direccionamiento que varían de posición entre dos o tres opciones, es más probable que sea de dirección por solenoide; sin embargo, si las ruedas de dirección cambian suavemente de posición es casi seguro que están asistidas por un servomotor.

La razón de modificar un juguete es hacer posible su control mediante un microprocesador, ya que utilizaremos sus motores, transmisión y servos, pero descartaremos sus mecanismos electromecánicos de control. Por tanto, será necesario diseñar una circuitería nueva que sustituya a la antigua de control del juguete. Antes de que esto sea factible debemos obtener información de las características de los motores, para ello deberemos mantener, de momento, los motores conectados a la circuitería antigua, mientras realizamos las mediciones necesarias.

Lo primero será desarmar el juguete para que queden accesibles los motores y servos o actuadores, luego identificar el o los motores de tracción que estarán unidos a los ejes de las ruedas mediante trenes de engranajes. La tensión de empleo de los motores y servos será normalmente la que den las pilas del juguete, sin embargo, no es infrecuente que haya un divisor de tensión para llevar la mitad de la tensión a cada rueda; si todo esto no es posible mide la tensión en cada motor mientras el juguete está funcionando.

En casi todos los juguetes los motores de tracción están unidos al resto de la circuitería por dos cables, pero a menudo se suelda un condensador directamente entre los contactos de los motores de tracción. Este condensador suprime los picos de tensión que producen los motores y se debe dejar en su lugar

❖ Sensores

Percepción

Los humanos no damos, a menudo, importancia al funcionamiento de nuestros sistemas sensoriales. Vemos una taza sobre una mesa, la cogemos automáticamente y no pensamos en ello, al menos no somos conscientes de pensar mucho en ello. De hecho, el conseguir beber de una taza requiere una compleja interacción de sentidos, interpretación, conocimiento y coordinación, que, en la actualidad, entendemos mínimamente.

Por tanto, infundir a un robot prestaciones de tipo humano resulta ser tremendamente difícil. Los juegos de ordenador que derrotan a los campeones de ajedrez son comunes en nuestros días, mientras que un programa que reconozca una silla, por ejemplo, en una escena arbitraria aún no existe. El "ordenador paralelo" que todos tenemos en nuestra cabeza dedica grandes cantidades de materia gris a los problemas de la percepción y la manipulación.

Transducción / Entendimiento

A pesar de que nos gustaría que entendiera y fuera consciente de su entorno, en realidad, un robot está limitado por los sensores que le proporcionamos y el programa que le cargamos. Sentir no es percibir. Los sensores son meramente traductores que

convierten algunos fenómenos físicos en señales eléctricas que un microprocesador puede leer. Esto se podría hacer mediante un convertidor analógico – digital (A/D) en el microprocesador, cargando el valor de un puerto de entrada – salida (I/O), o usando una interrupción externa. Siempre se necesita que haya alguna interfaz electrónica entre el sensor y el microprocesador para acondicionar o amplificar la señal.

Niveles de abstracción

Con el software podemos crear diferentes núcleos de abstracción, para que nos ayude como programadores a pensar acerca de los datos de los sensores de diferentes modos. En el nivel más alto, el sistema inteligente, para parecer “listo” necesita tener algunas variables para hacer malabares con ellas: ¿Está esta habitación a oscuras? ¿Acaba de entrar alguien? ¿Hay una pared a la izquierda?

Sin embargo, las únicas cuestiones que el robot es capaz de plantearse son tales como: ¿Ha caído la resistencia en el fotosensor? ¿Ha subido la tensión en el sensor piroeléctrico conectado al cuarto canal A/D por encima del umbral? ¿Ha cambiado el nivel en la salida del detector de proximidad infrarrojo?

No obstante, es posible infundir muchas capacidades en un robot móvil. El Robot II, construido en el Naval Ocean Systems Center, sirve de centinela móvil (patrullando un edificio, evitando obstáculos, observando intrusos) y es capaz de encontrar su puesto de recarga para enchufarse.

Este robot contiene un gran número de sensores, tales como detectores de infrarrojos de proximidad para evitar obstáculos, sensores para localización, sensores de microondas para detectar movimientos, sensores piroeléctricos para detectar intrusos y temperatura, y sensores de terremotos e inclinaciones para identificar desastres.

Otro robot móvil cubierto de sensores es Attila, del tamaño de una caja de zapatos, con seis patas para explorar en todo terreno. Los sensores de las patas se emplean para detectar obstáculos y pasar por encima de ellos. Lleva galgas extenso métricas a lo largo de sus espinillas para detectar colisiones, potenciómetros en los motores de sus articulaciones para la calibración de su posición y sensores de contacto en sus pies para asegurar pisadas estables. Sobre el chasis están montados varios sensores. “Bigotes”

en el frente para la detección de colisiones, un sensor de proximidad de largo alcance mide el espacio libre y una pequeña cámara recoge imágenes.

Interfaz con los sensores

Nos centraremos en varios tipos de sensores simples y en cómo realizar la interfaz entre ellos y el microprocesador. Veremos varios ejemplos de interfaces de sensores y de controladores de sensores (fotosensores, interruptores de impacto, micrófonos, sensores piroeléctrico de personas, sensores de proximidad de infrarrojo cercano, sonars, sensores de flexión, giróscopos, acelerómetros, sensores de fuerza, brújulas y cámaras) se pueden comprar a bajo coste para interfaz en un pequeño robot móvil.

Controladores software

Una vez relacionados los sensores y la interfaz adecuada diseñada para conectar los sensores al microprocesador, éste debe ser programado para leer los sensores. Estos trozos de código se escriben a menudo en lenguaje ensamblador y se conocen como **software drivers** o controladores software.

Los controladores **software** son fragmentos de código que proporcionan una interfaz bien definida entre un dispositivo **hardware** y un programa que necesita utilizar a ese dispositivo.

Los controladores software tratan con el interfaz hardware – software. Estas rutinas podrían constantemente consultar un contacto A/D, esperando el disparo de un sensor piroeléctrico, o podrían estar implementadas como manejadores de interrupciones que solo son llamadas cuando la señal devuelta, por ejemplo, por un sensor infrarrojo de proximidad de nivel alto.

El código del controlador de sensores podría tomar estos datos y almacenarlos en una posición de memoria. Estos datos entonces se convierten en alimento para un nivel de abstracción más alto. Por ejemplo, otra parte del sistema de inteligencia podría usar esa señal o variable para disparar un comportamiento o quizás lo combine con otra información en un tipo de sensor virtual. No olvidar los diferentes niveles de abstracción, cuando los sensores raramente alcancen el grado de perfección que nos gustaría.

Sensibilidad y Alcance

Hay dos conceptos importantes a entender cuando se analiza la sensibilidad y el alcance de cualquier tipo de sensor. La sensibilidad es una medida de hasta qué grado la salida de la señal cambia a la vez que las cantidades de las magnitudes medidas. Llamemos a la salida del sensor r y a la cantidad física medida x . Por ejemplo, un fotodetector podría tener una tensión de salida de, digamos, 0.87 V (r) cuando es bombardeado por $2.3 \cdot 10^{13}$ fotones por segundo (x).

Un pequeño cambio en la cantidad medida, dx , se relaciona con un pequeño cambio en la repuesta del sensor, dr , mediante la sensibilidad S .

Un dispositivo sensor reacciona a la variación de niveles de algunos estímulos físicos produciendo una tensión característica de salida (o corriente, o frecuencia, etc.). Casi siempre, la circuitería asociada al sensor después amplifica o transforma esta tensión y la introduce en un convertidor analógico-digital conectado a un microprocesador. El convertidor A/D es sensible sólo a rangos limitados de tensiones, frecuentemente 0 á 5 V. En el caso del convertidor A/D de 8-bits, este voltaje se convierte en 256 (28) niveles discretos. Esta es por tanto la ventana del microprocesador al mundo.

No importa lo complejos y sutiles que sean todos los fenómenos se reducen a un número, o conjunto de números, con valores entre 0 y 255.

Es, por tanto, importante tener en cuenta cuidadosamente cómo una cantidad física se transforma en un valor digital accesible por el microprocesador. Por ejemplo, existen opciones lineales y logarítmicas para hacer la correspondencia de tensiones a números. Supóngase que el movimiento de un brazo robótico se restringe a un alcance bien definido, de 0 á 90 grados. Deseamos conocer su posición con igual sensibilidad en todas las partes de su alcance. Bajo estas circunstancias, una correspondencia lineal de los ángulos de las articulaciones con las lecturas A/D, como la que proporciona un sencillo circuito de potenciómetro es adecuada.

El caso de un fotodiodo es más complicado, ya que el nivel de iluminación que produce la luz solar es varios órdenes de magnitud mayor que el que ofrece la luz artificial. A nosotros nos gustaría que nuestro robot fuera capaz de sentir las variaciones de luz tanto si está en una habitación luminosa como si está en una habitación oscura.

En una escala de unidades de iluminación arbitrarias, supongamos que la iluminación típica en una habitación luminosa varía, digamos, de 10 a 1000 unidades, mientras que en una habitación oscura es de 0.1 a 10. Si escogemos componentes para el circuito de nuestro sensor de modo que los niveles de iluminación entre 0.1 y 1000 se correspondan linealmente con los valores A/D de 0 a 255, entonces el robot tendrá una buena sensibilidad en una habitación luminosa; sin embargo, cualquier nivel de iluminación por debajo de 2 unidades se corresponderá con 0 unidades A/D. Por ello, el robot será prácticamente incapaz de detectar cualquier diferencia de nivel de iluminación en una habitación pobremente iluminada.

Una manera de corregir este problema es mediante la correspondencia logarítmica. Un amplificador logarítmico produce una tensión proporcional al logaritmo de la salida del fotodiodo. Este circuito tiene la propiedad de incrementar la sensibilidad a pequeños cambios de intensidad de luz cuando el robot está en una habitación oscura y de disminuirla en habitaciones muy iluminadas. Así el robot puede trabajar en un rango mucho mayor de niveles de iluminación.

En general, la salida de un sensor no será ni lineal ni logarítmica en sentido estricto, esto, sin embargo, no representa un problema en la medida en la que el que construye un robot tenga una idea clara de la respuesta del sensor y de las condiciones bajo las que el robot tiene que trabajar.

Sensores de Luz

Los sensores de luz visible y de infrarrojos cubren un amplio espectro de complejidad. Las fotocélulas se encuentran entre los más sencillos de todos los sensores para hacer su interfaz con el microprocesador, y la interpretación de la salida de una fotocélula es directa. Las cámaras de vídeo, por el contrario, requieren una buena cantidad de circuitería especializada para hacer que sus salidas sean compatibles con un microprocesador, además las complejas imágenes que las cámaras graban son todo menos fácil de interpretar.

Fotorresistencias

Los sensores de luz posibilitan comportamientos de un robot tales como esconderse en la oscuridad, jugar con un flash, y moverse hacia una señal luminosa. Los sensores de luz simples son fotorresistencias, fotodiodos o fototransistores. Una fotorresistencia (o fotocélula) tiene una interfaz con un microprocesador fácil de hacer.

Las fotorresistencias son simplemente resistencias variables con la luz en muchos aspectos parecidos a los potenciómetros, excepto en que estos últimos varían girando un botón.

Los fototransistores dan mayor sensibilidad a la luz que las fotorresistencias. Un fototransistor tiene una interfaz con un microprocesador casi tan fácil como el de una fotorresistencia.

Los fotodiodos tienen una gran sensibilidad, producen una salida lineal en un amplio rango de niveles de luz, y responden con rapidez a los cambios de iluminación. Esto les hace útiles en los sistemas de comunicación para detectar luces moduladas; el mando a distancia de casi todos los TV, equipos estéreos y reproductores de CD los emplean. La salida de un fotodiodo requiere, no obstante, amplificación antes de poder ser empleada por un microprocesador.

Detectores de proximidad infrarrojos

Los comportamientos de seguimiento son fáciles de implementar en un robot móvil, aunque los sensores de infrarrojos no nos dan la distancia real a un objeto, sí nos dicen si está o no presente en su cono de detección. Este tipo de sensores tiene un ancho de haz mucho más estrecho que el de los sonar. El seguimiento de paredes empleando dos detectores es muy corriente. Incluso es posible seguir una pared usando sólo un detector moviéndose diagonalmente como hacen los veleros respecto del viento. En este caso el robot tiene que girar alejándose de la pared cuando detecta algo y girar acercándose a la pared cuando no detecta nada.

5. Robot de servicios y teleoperados

Los **robots de servicio** se pueden definir como: Dispositivos electromecánicos móviles o estacionarios, dotados normalmente de uno o varios brazos mecánicos independientes, controlados por un programa ordenador y que realizan tareas no industriales de servicio.

En esta definición entrarían, entre otros, los robots dedicados a cuidados médicos, educación, domésticos, uso en oficinas, intervención en ambientes peligrosos, aplicaciones espaciales, aplicaciones submarinas y agricultura. Sin embargo, esta definición de robots de servicio excluye la tele-manipulador, pues estos no se mueven mediante el control de un programa ordenador, sino que están controlados directamente por el operador humano.



Ejemplos de robots de servicio: robots subacuáticos; robots escaladores; robots contra incendios y bombas; robots para manejo de material nuclear



Ejemplos de robots de servicio: robots aspiradora para uso doméstico:



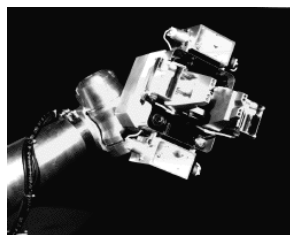
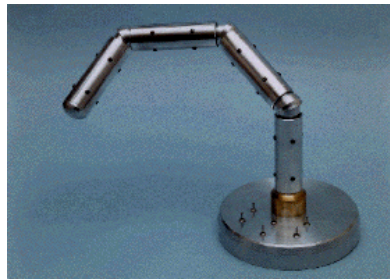
Ejemplo de robots de servicio: robots quirúrgicos y de asistencia quirúrgica; robots para personas discapacitadas

Los **robots teleoperados** son definidos por la NASA como: Dispositivos robóticos con brazos manipuladores y sensores con cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa, o mediante un ordenador.

Telerobots

En el diseño de Telerobots se desarrollan y aplican las tecnologías para el funcionamiento dirigido de telerobots en el espacio y en las aplicaciones terrestres. El telerobot dirigido, operando en un sitio, utiliza dispositivos de entrada, como la visualización gráfica, planeando las ayudas para ordenar la ejecución de una tarea a un sitio remoto usando un sistema telerobótico. Las áreas actuales de investigación y desarrollo incluyen:

- El manipulador y el mando del robot móvil.
- Las arquitecturas del telerobot remotas.
- Procesado, integración, y fusión, del sistema sensorial.
- Tareas interactivas que planea y ejecuta.
- La visualización gráfica de las imágenes sobrepuestas.
- Multisensor - el mando equilibrado.
- Micromecanismos - control para el despliegue de los instrumentos.



Desde la izquierda: (1) Vista del laboratorio de Telerobots dirigido; (2) Un "brazo de serpiente" utilizado para el acceso diestro durante una inspección; (3) Un extremo de un sensor-actuador integrado (ISEE) utilizado en el robot Sojourner para la inspección del planeta Marte; (4) prototipo del Rocky7, el Vagabundo de Marte, probando su brazo desplegado; (5) y (6) Robots que ayudan a un sistema de microcirugía.

6. El sistema robótico

❖ Análisis del sistema. Unidades funcionales

Todos los robots son sistemas, es decir, constan de componentes que forman un todo. El sistema robótico se puede analizar de lo general a lo particular utilizando el análisis sistemático. El primer paso es considerar al sistema como una "caja negra", no sabemos qué hay en su interior, pero podemos identificar la entrada y salida del sistema. La entrada genuina al robot está constituida por las órdenes humanas; la salida está formada por diversos tipos de trabajo realizado automáticamente.

La segunda etapa o paso de análisis es mirar dentro de la caja negra donde encontramos los subsistemas o unidades funcionales del robot. Cada unidad funcional realiza una función específica y tiene su propia entrada y salida. Los robots tienen las siguientes unidades funcionales principales:

- Estructura mecánica
- Transmisiones
- Sistema de accionamiento (actuadores)
- Sistema sensorial (sensores)
- Elementos terminales
- Sistema de control (controlador)
- Alimentación

La función del **controlador** es gobernar el trabajo de los **actuadores** (los dispositivos que originan el movimiento) y las **transmisiones** (modificadores del movimiento).

La **alimentación** proporciona la energía necesaria para todo el sistema. Además de estos tres subsistemas, los robots de segunda generación incorporan **sensores** que reciben la señal de realimentación procedente de los actuadores pasando la información al controlador, que debe calcular la corrección del error. El entorno proporciona también información que reciben los sensores y se envía de nuevo al controlador para hacer los ajustes necesarios para la realización de la tarea.

❖ Diseño de un Robot

En general hay cuatro tipos distintos de soluciones para los problemas a los que un robot se enfrenta. Dependiendo de las restricciones del problema, un tipo de solución será más apropiado que otro, pero raramente será un tipo aislado de soluciones quien proporcione el mejor resultado.

- Ingeniería del entorno.
- Cambio de la forma física del robot.
- Cambio del tipo de acciones que el robot lleva a cabo.
- Software de control más sofisticado para dirigir el comportamiento del robot.

Ingeniería del entorno

Los humanos utilizamos este método continuamente para hacernos la vida más fácil. Cuando estamos diseñando un robot hay ciertas características del entorno que podrían simplificar el diseño del mismo. Por ejemplo un robot de limpieza que en vez de trabajar de día trabajara de noche, evitando así el problema de la gente moviéndose por su entorno.

Cambio de la forma física del robot

La forma de un robot puede tener un gran impacto en sus prestaciones. Un robot no cilíndrico corre mayor riesgo de quedar atrapado por una disposición desfavorable de obstáculos o de fallar al encontrar un camino en un espacio estrecho o intrincado. Consideremos dos robots del mismo tamaño, uno cilíndrico y el otro cuadrado. Ambos encuentran un paso estrecho según se mueven. Un algoritmo sencillo permitirá al robot cilíndrico pasar, el robot choca, gira y lo intenta de nuevo hasta que pasa. Esto es así de simple porque el robot es capaz de girar estando en contacto con el obstáculo. El robot cuadrado, por el contrario, tiene que retroceder y girar si quiere usar la misma táctica. Por tanto, siempre se requiere un algoritmo más complejo para la navegación de un robot cuadrado que para la de uno cilíndrico. Para entender la razón de esto, tenemos que apelar a un concepto avanzado en robótica conocido como **espacio de configuraciones**.

Software de control más sofisticado para dirigir el comportamiento del robot.

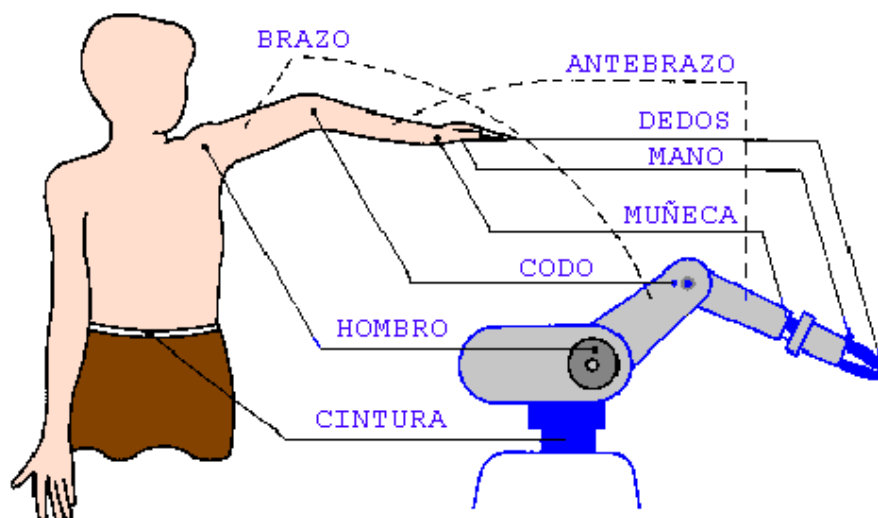
Un diseño sencillo puede ser suficiente para realizar la tarea encomendada si el software de control es lo suficientemente completo como para resolver todos los problemas a los que se enfrente.

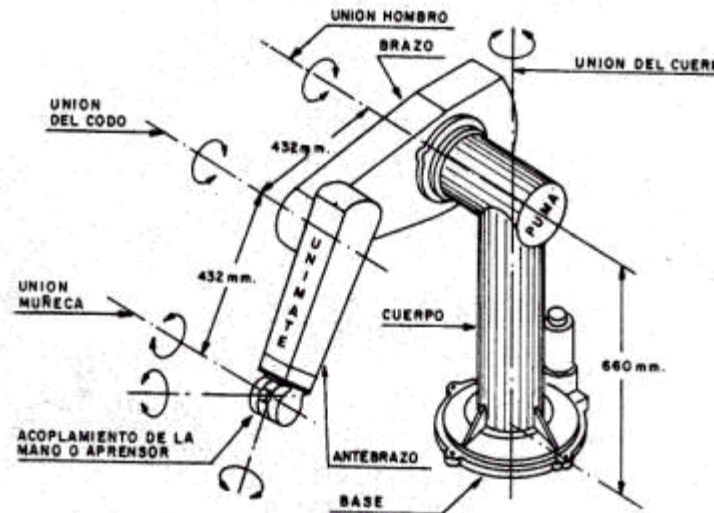
7. Estructura de un robot industrial

❖ Componentes

Como se adelantó en el sistema robótico, un robot está formado por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, actuadores, sensores, elementos terminales y controlador. Aunque los elementos empleados en los robots no son exclusivos de estos (máquinas herramientas y otras muchas máquinas emplean tecnologías semejantes), las altas prestaciones que se exigen a los robots han motivado que en ellos se empleen elementos con características específicas.

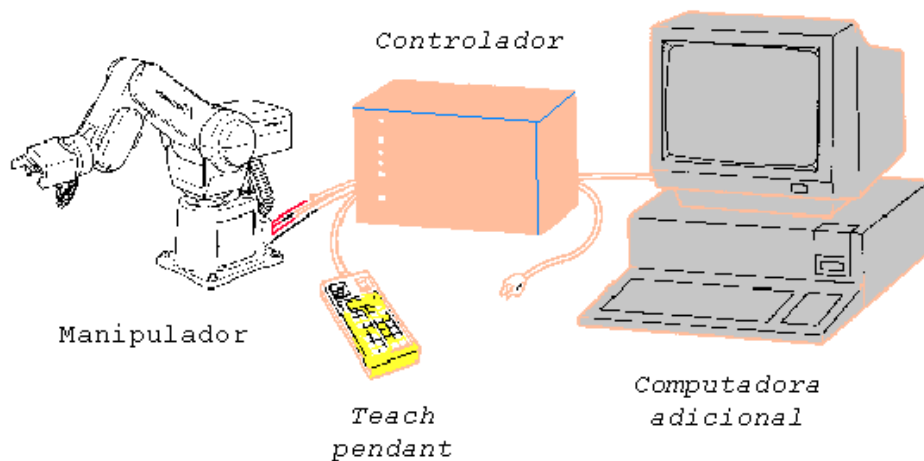
La constitución física de la mayor parte de los robots industriales guarda cierta similitud con la anatomía de las extremidades superiores del cuerpo humano, por lo que, en ocasiones, para hacer referencia a los distintos elementos que componen el robot, se usan términos como cintura, hombro, brazo, codo, muñeca, etc.





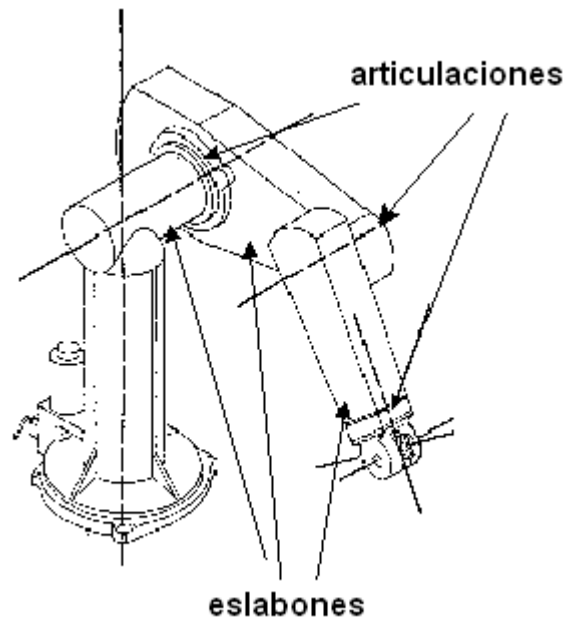
Los elementos que forman parte de la totalidad del robot son:

- manipulador
- controlador
- dispositivos de entrada y salida de datos
- dispositivos especiales

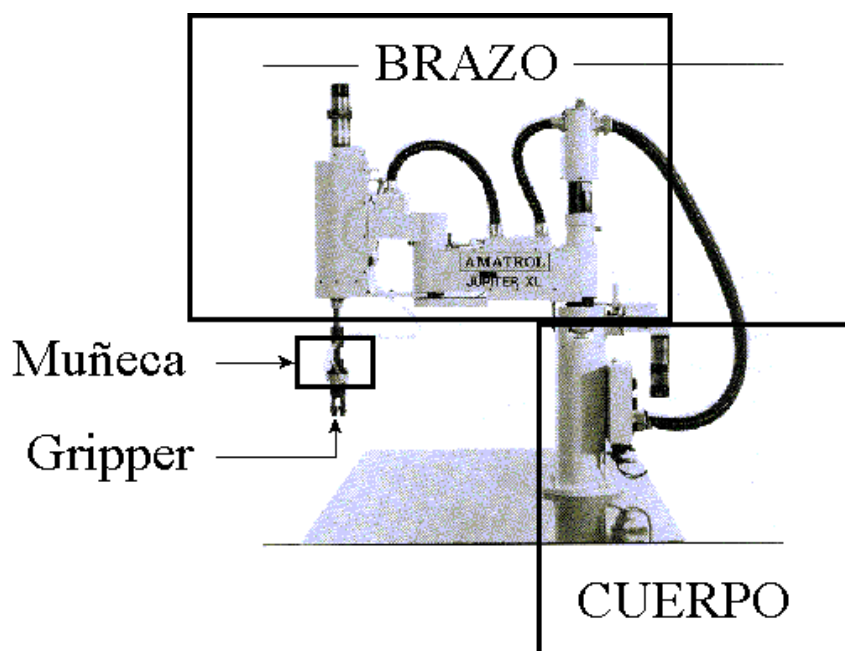


Manipulador

Mecánicamente, es el componente principal. Está formado por una serie de elementos estructurales sólidos o **eslabones** unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos.



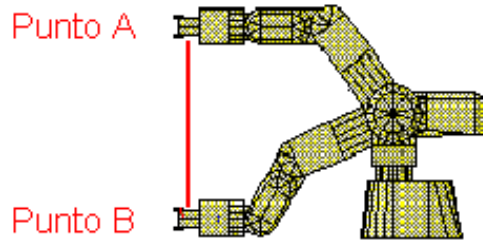
Las partes que conforman el manipulador reciben, entre otros, los nombres de: **cuerpo**, **brazo**, **muñeca** y **actuador_final** (o **elemento terminal**). A este último se le conoce habitualmente como **aprehensor**, **garra**, **pinza** o *gripper*.



Cada articulación provee al robot de, al menos, un grado de libertad. En otras palabras, las articulaciones permiten al manipulador realizar movimientos:

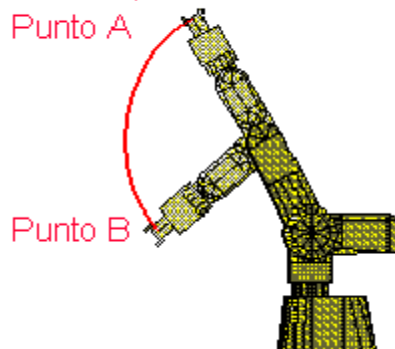
- **Lineales** que pueden ser horizontales o verticales.

Movimiento lineal entre los puntos A-B



- **Angulares (por articulación)**

Movimiento angular (por articulación) entre los puntos A-B



(En los dos casos la **línea roja** representa la trayectoria seguida por el robot).

Existen dos **tipos de articulación** utilizados en las juntas del manipulador:

- **Prismática /Lineal** - junta en la que el eslabón se apoya en un deslizador lineal. Actúa linealmente mediante los tornillos sinfín de los motores, o los cilindros.
- **Rotacional** - junta giratoria a menudo manejada por los motores eléctricos y las transmisiones, o por los cilindros hidráulicos y palancas.

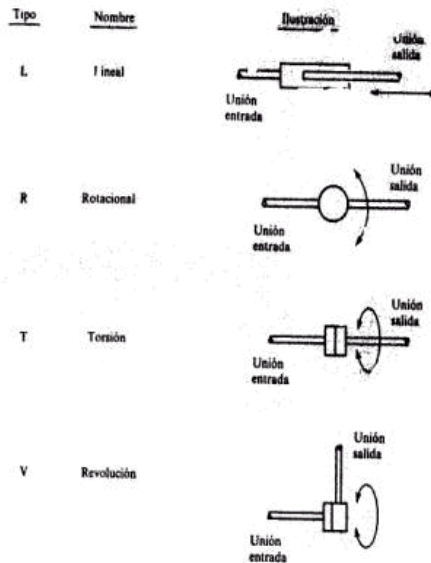
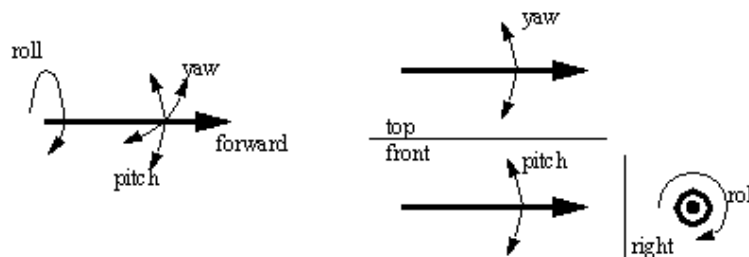
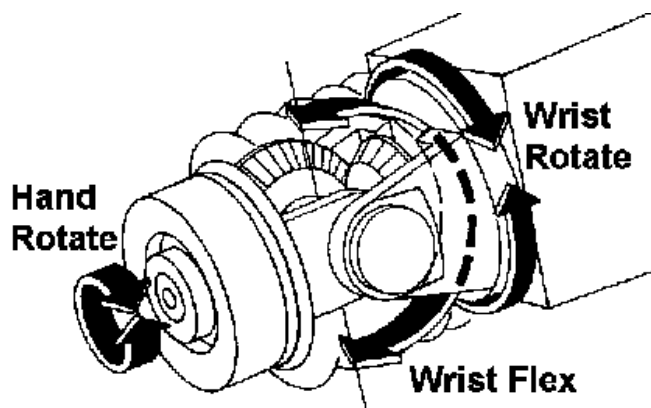


Figura 2-9. Varios tipos de articulaciones utilizadas en robots: (a) articulación rotacional con giro a lo largo de un eje perpendicular a los ejes de miembros del brazo, (b) articulación rotacional con una acción de torsión y (c) articulación de movimiento lineal, que suele conseguirse mediante una acción de deslizamiento.

Básicamente, la orientación de un eslabón del manipulador se determina mediante los elementos *roll*, *pitch* y *yaw*

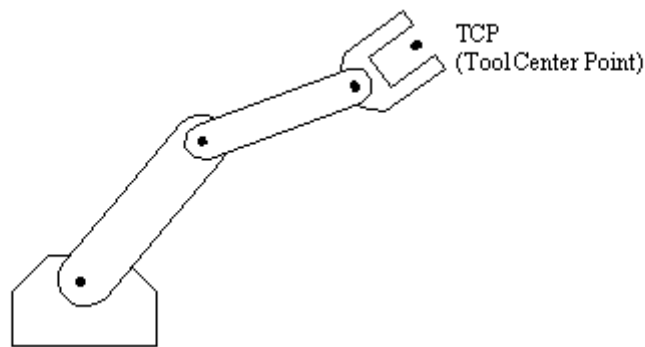


A la **muñeca** de un manipulador le corresponden los siguientes movimientos o grados de libertad: **giro** (*hand rotate*), **elevación** (*wrist flex*) y **desviación** (*wrist rotate*) como lo muestra el modelo inferior, aunque cabe hacer notar que existen muñecas que no pueden realizar los tres tipos de movimiento.



El **actuador final** (*gripper*) es un dispositivo que se une a la muñeca del brazo del robot con la finalidad de activarlo para la realización de una tarea específica. La razón por la que existen distintos tipos de elementos terminales es, precisamente, por las funciones que realizan. Los diversos tipos podemos dividirlos en dos grandes categorías: **pinzas y herramientas**.

Se denomina **Punto de Centro de Herramienta** (TCP, *Tool Center Point*) al punto focal de la pinza o herramienta. Por ejemplo, el TCP podría estar en la punta de una antorcha de la soldadura.



Controlador

Como su nombre indica, es el que regula cada uno de los movimientos del manipulador, las acciones, cálculos y procesamiento de la información. El 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 son 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

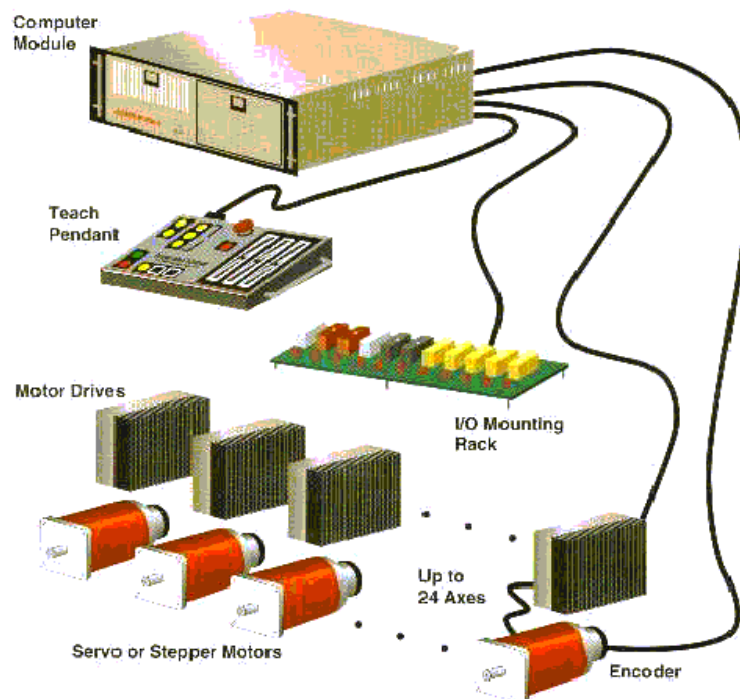
Otra clasificación de control es la que distingue entre **control en bucle abierto** y **control en bucle cerrado**.

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.

Dispositivos de entrada y salida

Los más comunes son: teclado, monitor y caja de comandos (*teach pendant*).

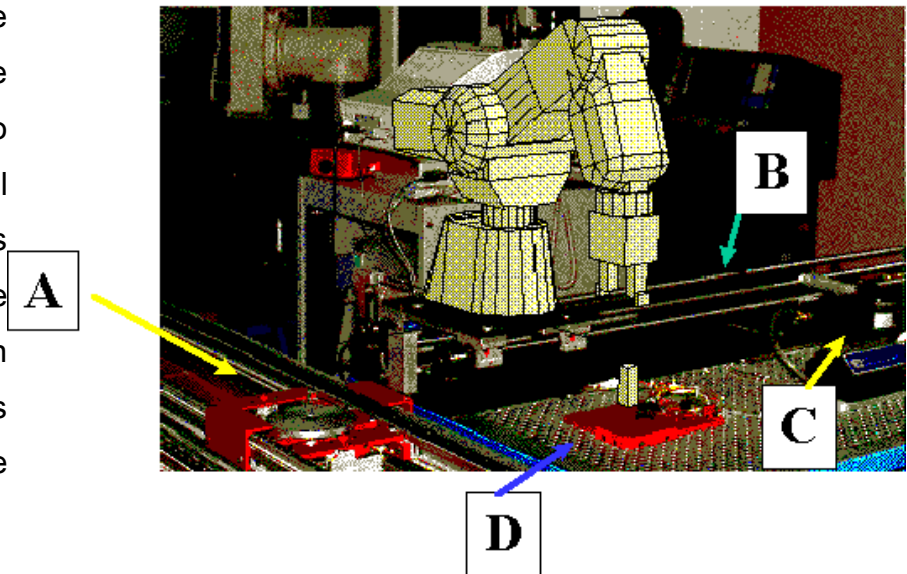
En el dibujo se tiene un controlador (**computer module**) que envía señales a los motores de cada uno de los ejes del robot y la caja de comandos (*teach pendant*) la cual sirve para enseñarle las posiciones al manipulador del robot.



Se pueden utilizar estas tarjetas para comunicar al robot, por ejemplo, con las máquinas de control numérico (torno...). Estas tarjetas se componen de relevadores, los cuales mandan señales eléctricas que después son interpretadas en un programa de control. Estas señales nos permiten controlar cuándo debe entrar el robot a cargar una pieza a la máquina, cuando deben empezar a funcionar la máquina o el robot, etc.

Dispositivos especiales

Entre estos se encuentran los ejes que facilitan el movimiento transversal del manipulador y las estaciones de ensamblaje, que son utilizadas para sujetar las distintas piezas de trabajo.



En la estación del robot Move Master EX (Mitsubishi) representada en la figura se pueden encontrar los siguientes dispositivos especiales:

- A. Estación de posición sobre el transportador para la carga/descarga de piezas de trabajo.
- B. Eje transversal para aumentar el volumen de trabajo del robot.
- C. Estación de inspección por ordenadora integrada con el robot.
- D. Estación de ensamble.

El robot cuenta con señales de entrada/salida para poder realizar la integración de su función incorporando estos elementos.

❖ Principales características de los Robots

A continuación se describen las características más relevantes propias de los robots y se proporcionan valores concretos de las mismas, para determinados modelos y aplicaciones.

- Grados de libertad
- Espacio de trabajo
- Precisión de los movimientos
- Capacidad de carga
- Velocidad
- Tipo de actuadores
- Programabilidad

Grados de libertad (GDL)

Cada uno de los movimientos independientes (giros y desplazamientos) que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior. Son los parámetros que se precisan para determinar la posición y la orientación del elemento terminal del manipulador. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los GDL de las articulaciones que lo componen. Puesto que las articulaciones empleadas suelen ser únicamente de rotación y prismáticas, con un solo grado de libertad cada una, el número de GDL del robot suele coincidir con el número de articulaciones que lo componen.

Puesto que para posicionar y orientar un cuerpo de cualquier manera en el espacio son necesarios seis parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación, si se pretende que un robot posicione y oriente su extremo (y con él la pieza o herramienta manipulada) de cualquier modo en el espacio, se precisará al menos seis grados de libertad.



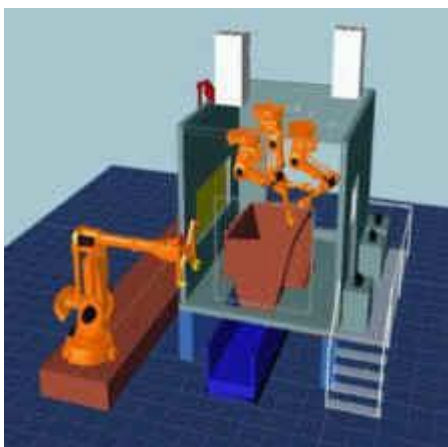
En la imagen se muestra el esquema de un robot de estructura moderna con 6 GDL; tres de ellos determinan la posición del aprehensor en el espacio (q_1 , q_2 y q_3) y los otros 3, la orientación del mismo (q_4 , q_5 y q_6).

Un mayor número de grados de libertad conlleva un aumento de la flexibilidad en el posicionamiento del elemento terminal. Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales requieren 6 GDL, como las de la soldadura, mecanizado y paletización, otras más complejas requieren un número mayor, tal es el caso en las labores de montaje. Si se trabaja en un entorno con obstáculos, el dotar al robot de grados de libertad adicionales le permitirá acceder a posiciones y orientaciones de su extremo a las que, como consecuencia de los obstáculos, no hubieran llegado con seis grados de libertad. Otra situación frecuente es dotar al robot de un grado de libertad adicional que le permita desplazarse a lo largo de un carril aumentando así el volumen del espacio al que puede acceder. Tareas más sencillas y con movimientos más limitados, como las de la pintura y paletización, suelen exigir 4 o 5 GDL.

Cuando el número de grados de libertad del robot es mayor que los necesarios para realizar una determinada tarea se dicen que el **robot es redundante**.

Observando los movimientos del brazo y de la muñeca, podemos determinar el número de grados de libertad que presenta un robot. Generalmente, tanto en el brazo como en la muñeca, se encuentra un abanico que va desde uno hasta los tres GDL. Los grados de libertad del brazo de un manipulador están directamente relacionados con su anatomía o configuración.

Espacio (volumen) de trabajo

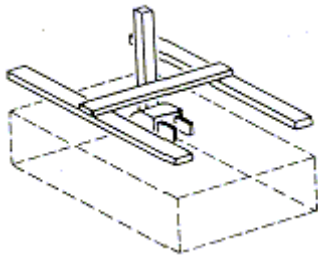


Las dimensiones de los elementos del manipulador, junto a los grados de libertad, definen la zona de trabajo del robot, característica fundamental en las fases de selección e implantación del modelo adecuado.

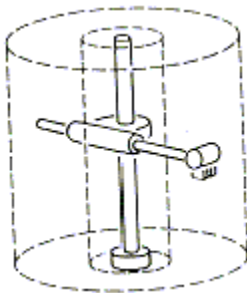
La zona de trabajo se subdivide en áreas diferenciadas entre sí, por la accesibilidad específica del elemento terminal (aprehensor o herramienta), es diferente a la que permite orientarlo verticalmente o con el determinado ángulo de inclinación. También queda restringida la zona de trabajo por los límites de giro y desplazamiento que existen en las articulaciones.

El volumen de trabajo de un robot se refiere únicamente al espacio dentro del cual puede desplazarse el extremo de su muñeca. Para determinar el volumen de trabajo no se toma en cuenta el actuador final. La razón de ello es que a la muñeca del robot se le pueden adaptar *grippers* de distintos tamaños.

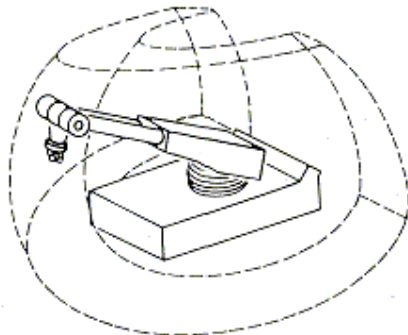
Para ilustrar lo que se conoce como **volumen de trabajo regular** y **volumen de trabajo irregular**, tomaremos como modelos varios robots.



El **robot cartesiano** y el **robot cilíndrico** presentan volúmenes de trabajo regulares. El robot cartesiano genera una figura cúbica.

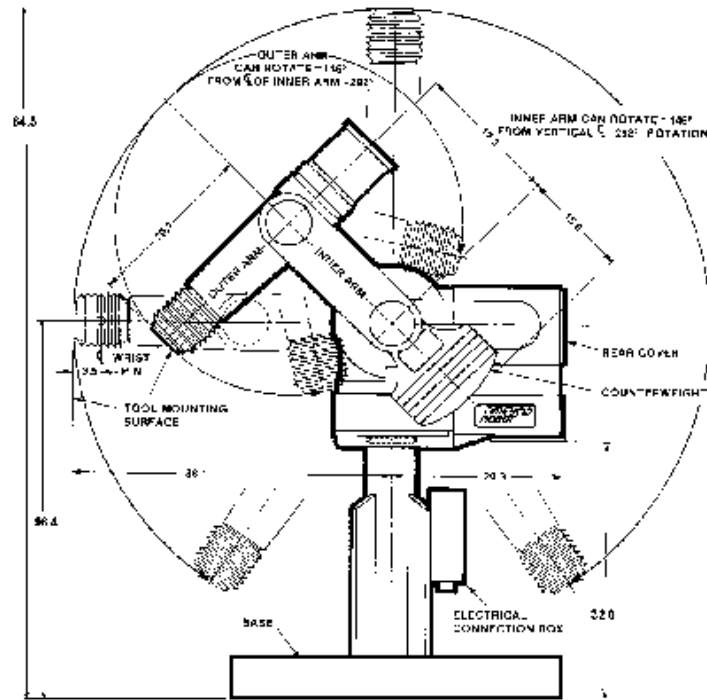


El robot de **configuración cilíndrica** presenta un volumen de trabajo parecido a un cilindro (normalmente este robot no tiene una rotación de 360°)



Por su parte, los robots que poseen una **configuración polar**, los de brazo articulado y los modelos **SCARA** presentan un volumen de trabajo irregular.

Para determinar el volumen de trabajo de un robot industrial, el fabricante generalmente indica un plano con los límites de movimiento que tiene cada una de las articulaciones del robot, como en el siguiente caso:



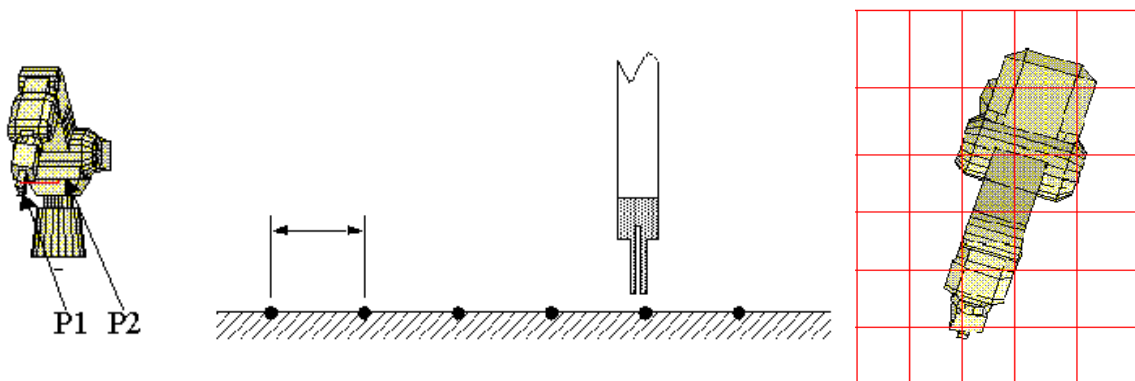
Precisión de los movimientos

La precisión de movimiento en un robot industrial depende de tres factores:

- resolución espacial
- exactitud
- repetibilidad

La **resolución espacial** se define como el incremento más pequeño de movimiento en que el robot puede dividir su volumen de trabajo.

Para explicar con mayor precisión el término resolución espacial tomemos el siguiente ejemplo:



En el dibujo anterior supongamos que utilizando el *teach pendant* movemos el robot de P1 al P2. P2-P1 representa el menor incremento con el que se puede mover el robot a partir de P1. Si vemos estos incrementos en un plano se vería como una cuadrícula. En cada intersección de líneas se encuentra un punto "direccionable", es decir un punto que puede ser alcanzado por el robot. De esta forma la resolución espacial puede definirse también como la distancia entre dos puntos adyacentes (en la figura la distancia entre puntos está muy exagerada a efectos de explicar el término). Estos puntos están típicamente separados por un milímetro o menos, dependiendo del tipo de robot.

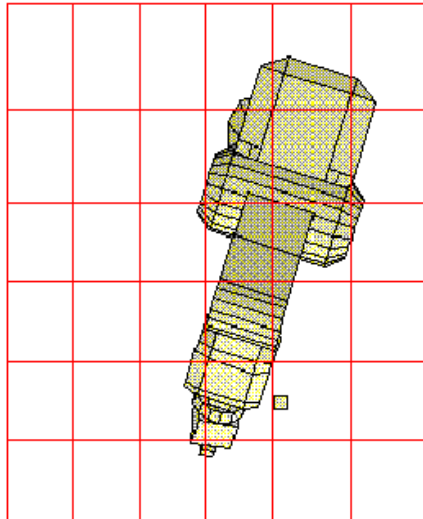
La resolución espacial depende de dos factores: los **sistemas que controlan la resolución** y las **inexactitudes mecánicas**.

Depende del **control del sistema** porque éste, precisamente, es el medio para controlar todos los incrementos individuales de una articulación. Los controladores dividen el intervalo total de movimiento para una junta particular en incrementos individuales (resolución de control o de mando). La habilidad de dividir el rango de la junta en incrementos depende de la capacidad de almacenamiento en la memoria de mando. El número de incrementos separados e identificables para un eje particular es: 2^n . Por ejemplo, en un robot con $n=8$ la resolución de mando puede dividir el intervalo del movimiento en 256 posiciones discretas. Así, la resolución de mando es: *intervalo de movimiento/256*. Los incrementos casi siempre son uniformes.

Las **inexactitudes mecánicas** se encuentran estrechamente relacionadas con la calidad de los componentes que conforman las uniones y las articulaciones. Como ejemplos de inexactitudes mecánicas pueden citarse la holgura de los engranajes, las tensiones en las poleas, las fugas de fluidos, etcétera.

La **exactitud** se refiere a la capacidad de un robot para situar el extremo de su muñeca en un punto señalado dentro del volumen de trabajo. Mide la distancia entre la posición especificada, y la posición real del actuador terminal del robot. Mantiene una relación directa con la resolución espacial, es decir, con la capacidad del control del robot de dividir en incrementos muy pequeños el volumen de trabajo.

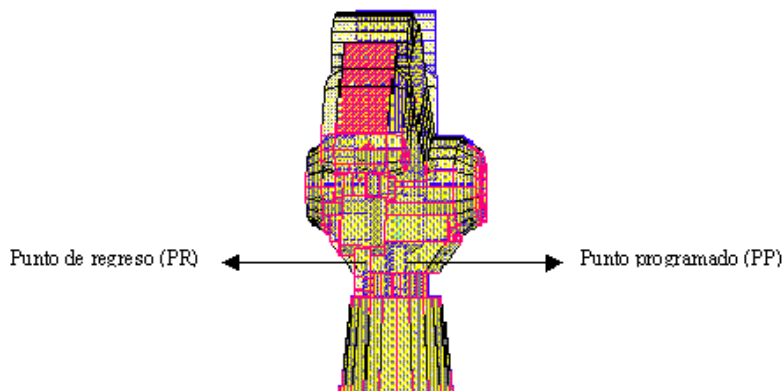
En el siguiente dibujo, si quisiéramos mover el robot exactamente al punto donde se encuentra la pieza de trabajo, el robot solamente podría acercarse al objeto posicionándose en el punto direccionables más próximo. En otras palabras, no podría colocarse exactamente en la posición requerida.



Un robot presenta una mayor exactitud cuando su brazo opera cerca de la base. A medida que el brazo se aleja de la base, la exactitud se irá haciendo menor. Esto se debe a que las inexactitudes mecánicas se incrementan al ser extendido el brazo. Otro factor que afecta a la exactitud es el peso de la carga; las cargas más pesadas reducen la exactitud (al incrementar las inexactitudes mecánicas). El peso de la carga también afecta la velocidad de los movimientos del brazo y la resistencia mecánica.

Si las inexactitudes mecánicas son despreciables la Exactitud = resolución de mando/2

La **repetibilidad**, se refiere a la capacidad del robot de regresar al punto programado las veces que sean necesarias. Esta magnitud establece el grado de exactitud en la repetición de los movimientos de un manipulador al realizar una tarea programada.

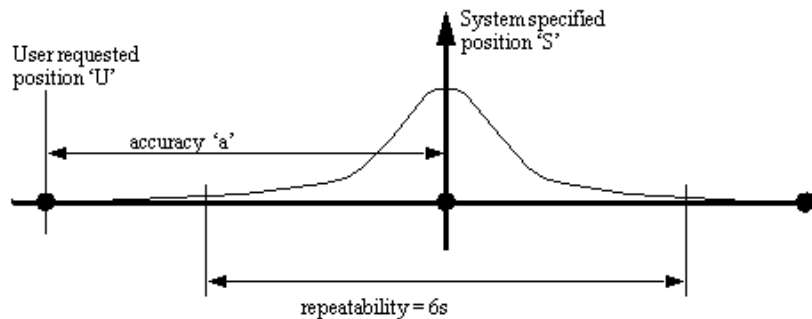


En el dibujo anterior al robot se le indicó mediante un comando de programación que regresara al punto **PP** (punto programado). El robot se puede colocar en el punto de regreso (**PR**) o en otro punto de regreso que tenga la misma distancia hacia **PP**. En el dibujo la diferencia entre los puntos **PP** y **PR** está muy exagerado. Dependiendo del trabajo que se deba realizar, la precisión en la repetibilidad de los movimientos es mayor o menor. Así por ejemplo, en labores de ensamblaje de piezas, dicha característica ha de ser menor a ± 0.1 mm. En soldadura, pintura y manipulación de piezas, la precisión en la repetibilidad está comprendida entre 1 y 3 mm y en las operaciones de mecanizado, la precisión ha de ser menor de 1mm.

La repetibilidad de punto es a menudo más pequeña que la exactitud.

Comentarios:

- Los errores al azar (fricción, torcimiento estructural, la dilatación térmica, ...), que aumentan conforme el robot opera e impiden al robot volver a la misma situación exacta, pueden asociarse a una distribución de probabilidad sobre cada punto.

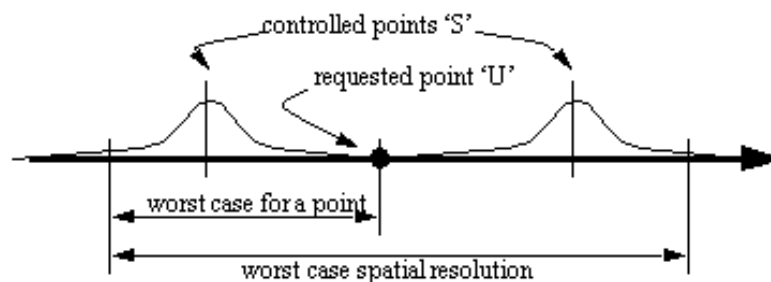


$$a = \frac{\text{control resolution}}{2}$$

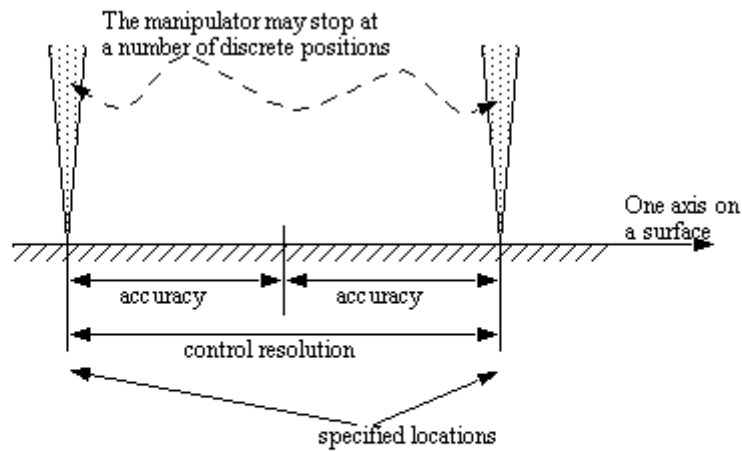
$$e_{max} = a + \text{modeling error} + 3s$$

If the distribution is normal, the limits for repeatability are typically chosen as ± 3 standard deviations 's'.

We can look at distributions for each specified position for the robot end effector in relationship to other point distributions. This will give us overall accuracy, and spatial resolution.

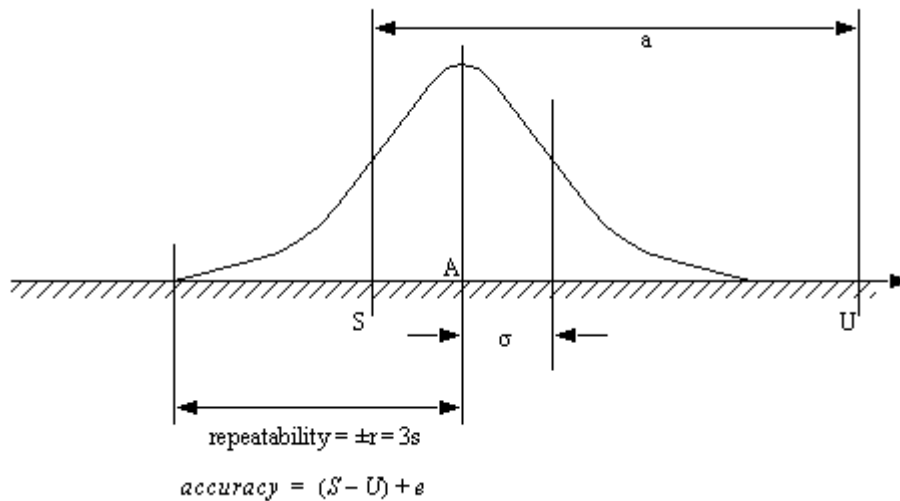


- En una situación mecánica perfecta, la exactitud y la resolución del mando se determinarían como a continuación:



In an ideal situation the manipulator would stop at the specified locations. Here the accuracy would be half of the control resolution. The control resolution would be the smallest divisions that the workspace could be divided into (often by the resolution of digital components).

- Puntos significativos para la determinación de la precisión:



Capacidad de carga

El peso, en kilogramos, que puede transportar la garra del manipulador recibe el nombre de capacidad de carga. A veces, este dato lo proporcionan los fabricantes, incluyendo el peso de la propia garra.

En modelos de **robots industriales**, la capacidad de carga de la garra, puede oscilar de entre 205kg. y 0.9Kg. La capacidad de carga es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un robot, según la tarea a la que se destine. En soldadura y mecanizado es común precisar capacidades de carga superiores a los 50kg.

Velocidad

Se refiere a la velocidad máxima alcanzable por el **TCP** o por las articulaciones. En muchas ocasiones, una velocidad de trabajo elevada, aumenta extraordinariamente el rendimiento del robot, por lo que esta magnitud se valora considerablemente en la elección del mismo.

En tareas de soldadura y manipulación de piezas es muy aconsejable que la velocidad de trabajo sea alta. En pintura, mecanizado y ensamblaje, la velocidad debe ser media e incluso baja.

Tipos de actuadores

Los elementos motrices que generan el movimiento de las articulaciones pueden ser, según la energía que consuman, de tipo OLE hidráulico, neumático o eléctrico.

Los actuadores de tipo OLE hidráulico se destinan a tareas que requieren una gran potencia y grandes capacidades de carga. Dado el tipo de energía que emplean, se construyen con mecánica de precisión y su coste es elevado. Los robots hidráulicos se diseñan formando un conjunto compacto la central hidráulica, la cabina electrónica de control y el brazo del manipulador.

La energía neumática dota a sus actuadores de una gran velocidad de respuesta junto a un bajo coste, pero su empleo está siendo sustituido por elementos eléctricos.

Los motores eléctricos, que cubren la gama de media y baja potencia, acaparan el campo de la Robótica, por su gran precisión en el control de su movimiento y las ventajas inherentes a la energía eléctrica que consumen.

Programabilidad

La inclusión del controlador de tipo microelectrónica en los robots industriales, permite la programación del robot de muy diversas formas.

En general, los modernos sistemas de robots admiten la programación manual, mediante un módulo de programación.

Las programaciones gestual y textual, controlan diversos aspectos del funcionamiento del manipulador:

- Control de la velocidad y la aceleración.
- Saltos de programa condicionales.
- Temporizaciones y pausas.
- Edición, modificación, depuración y ampliación de programas.
- Funciones de seguridad.
- Funciones de sincronización con otras máquinas.
- Uso de lenguajes específicos de Robótica.

❖ Tipos de configuraciones morfológicas

La estructura del manipulador y la relación entre sus elementos proporcionan una configuración mecánica, que da origen al establecimiento de los parámetros que hay que conocer para definir la posición y orientación del elemento terminal. Fundamentalmente, existen cuatro estructuras clásicas en los manipuladores, que se relacionan con los correspondientes modelos de coordenadas en el espacio y que se citan a continuación: cartesianas, cilíndricas, esféricas, angulares. Así, el **brazo del manipulador** puede presentar cuatro configuraciones clásicas:

- cartesiana
- cilíndrica
- esférica
- de brazo articulado,

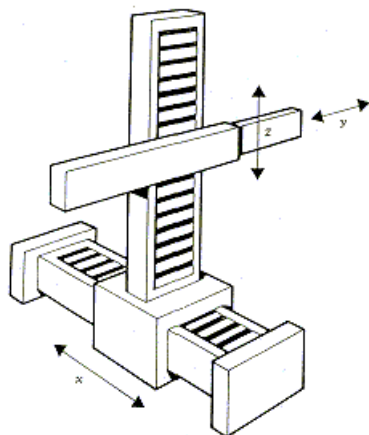
y una no clásica: **SCARA** (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*).

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Las combinaciones más frecuentes son con tres articulaciones, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto en el espacio. A continuación se presentan las características principales de las configuraciones del brazo manipulador.

Cartesiana / Rectilínea

El posicionando se hace en el espacio de trabajo con las articulaciones prismáticas. Esta configuración se usa bien cuando un espacio de trabajo es grande y debe cubrirse, o cuando la exactitud consiste en la espera del robot. Posee tres movimientos lineales, es decir, tiene tres grados de libertad, los cuales corresponden a los movimientos localizados en los ejes X, Y y Z.

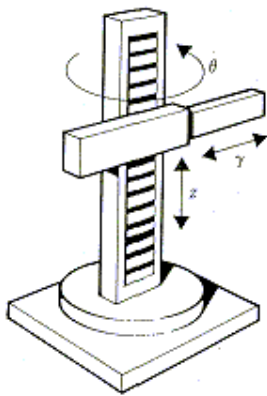
Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son con base en interpolaciones lineales. Interpolación, en este caso, significa el tipo de trayectoria que realiza el manipulador cuando se desplaza entre un punto y otro. A la trayectoria realizada en línea recta se le conoce como interpolación lineal y a la trayectoria hecha de acuerdo con el tipo de movimientos que tienen sus articulaciones se le llama interpolación por articulación.



Cilíndrica

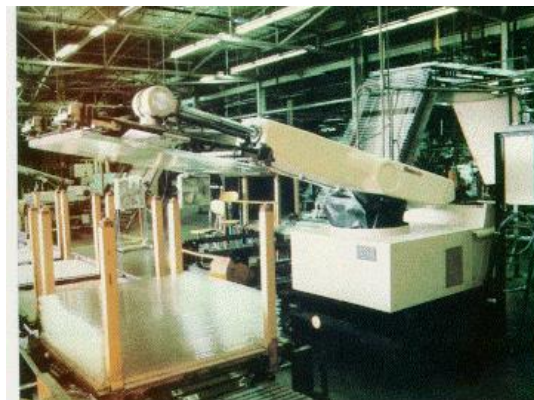
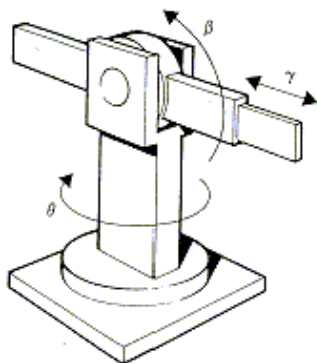
El robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una prismática para el radio. Este robot ajusta bien a los espacios de trabajo redondos. Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional, o sea, que presenta tres grados de libertad.

Este robot está diseñado para ejecutar los movimientos conocidos como interpolación lineal e interpolación por articulación. La interpolación por articulación se lleva a cabo por medio de la primera articulación, ya que ésta puede realizar un movimiento rotacional.



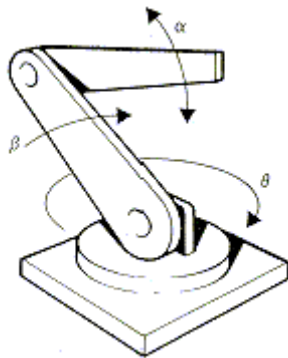
Esférica / Polar

Dos juntas de rotación y una prismática permiten al robot apuntar en muchas direcciones, y extender la mano a un poco de distancia radial. Los movimientos son: rotacional, angular y lineal. Este robot utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos primeras articulaciones y la interpolación lineal para la extensión y retracción.



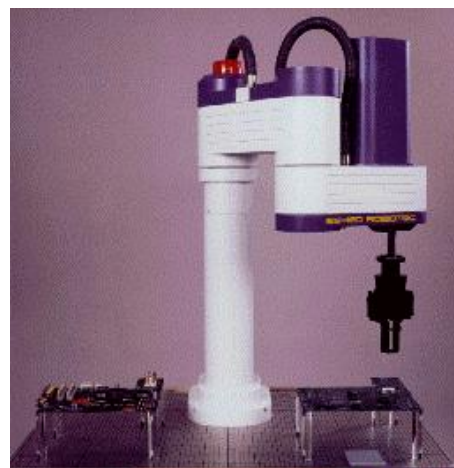
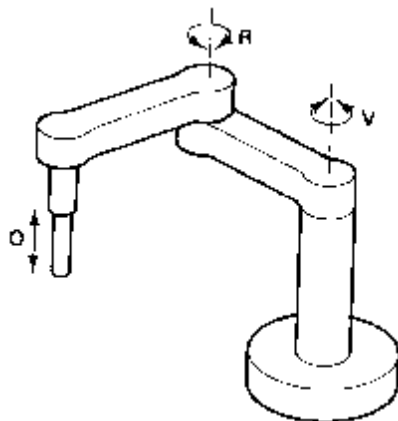
Brazo articulado / Articulación esférica / Articulación coordinada / Rotación / Angular

El robot usa 3 juntas de rotación para posicionarse. Generalmente, el volumen de trabajo es esférico. Estos tipos de robot se parecen al brazo humano, con una cintura, el hombro, el codo, la muñeca. Presenta una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento llamado interpolación lineal (para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es el de interpolación por articulación, tanto rotacional como angular.



SCARA

Similar al de configuración cilíndrica, pero el radio y la rotación se obtiene por uno o dos eslabones. Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. El robot de configuración **SCARA** también puede hacer un movimiento lineal (mediante su tercera articulación).



8. Transmisiones y reductores

Las **transmisiones** son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los **actuadores** hasta las **articulaciones**. Se incluirán junto con las transmisiones a los **reductores**, encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.

❖ Transmisiones

Dado que un robot mueve su extremo con aceleraciones elevadas, es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia. Del mismo modo, los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen directamente de la distancia de las masas al actuador. Por estos motivos se procura que los actuadores, por lo general pesados, estén lo más cerca posible de la base del robot. Esta circunstancia obliga a utilizar sistemas de transmisión que trasladen el movimiento hasta las articulaciones, especialmente a las situadas en el extremo del robot. Asimismo, las transmisiones pueden ser utilizadas para convertir movimiento circular en lineal o viceversa, cuando sea necesario.

Existen actualmente en el mercado robots industriales con acoplamiento directo entre accionamiento y articulación. Se trata, sin embargo, de casos particulares dentro de la generalidad que en los robots industriales actuales supone la existencia de sistemas de transmisión junto con reductores para el acoplamiento entre actuadores y articulaciones.

Es de esperar que un buen sistema de transmisión cumpla con una serie de características básicas:

- debe tener un tamaño y peso reducido;
- se ha de evitar que presente juegos u holguras considerables;
- se deben buscar transmisiones con gran rendimiento.

Aunque no existe un sistema de transmisión específico para los robots, sí existen algunos usados con mayor frecuencia, y que se mencionan en la tabla siguiente. La clasificación se ha realizado sobre la base del tipo de movimiento posible en la entrada y la salida: lineal o circular.

Sistemas de transmisión para robots			
Entrada-Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje Correa dentada Cadena Paralelogramo Cable	Pares altos Distancia grande Distancia grande	Holguras Ruido Giro limitado Deformabilidad
Circular-Lineal	Tornillo sin fin Cremallera	Poca holgura Holgura media	Rozamiento Rozamiento
Lineal-Circular	Paralelogramo articulado Cremallera	Holgura media	Control difícil Rozamiento

En esta tabla también quedan reflejados algunas ventajas e inconvenientes propios de algunos sistemas de transmisión. Entre ellas cabe destacar la holgura o juego. Es muy importante que el sistema de transmisión a utilizar no afecte al movimiento que transmite, ya sea por el rozamiento inherente a su funcionamiento o por las holguras que su desgaste pueda introducir. También hay que tener en cuenta que el sistema de transmisión sea capaz de soportar un funcionamiento continuo a un par elevado y, a ser posible, entre grandes distancias.

Las transmisiones más habituales son aquellas que cuentan con movimiento circular tanto a la entrada como a la salida. Incluidas en éstas se encuentran los engranajes, las correas dentadas y las cadenas.

❖ Reductores

En cuanto a los reductores, al contrario que con las transmisiones, sí existen determinados sistemas usados de manera preferente en los robots industriales. Esto se debe a que a los reductores utilizados en robótica se les exigen unas condiciones de funcionamiento muy restrictivas. La exigencia de estas características viene motivada por las altas prestaciones que se le piden al robot en cuanto a precisión y velocidad de posicionamiento. La siguiente tabla muestra valores típicos de los reductores para robótica actualmente empleados.

Características de los reductores para robótica	
Características	Valores típicos
Relación de reducción	50 / 300
Peso y tamaño	0.1 / 30 kg
Momento de inercia	0.0001 kg m ²
Velocidades de entrada máxima	6000 / 7000 rpm
Par de salida nominal	5700 N m
Par de salida máximo	7900 N m
Juego angular	0-2"
Rigidez torsional	100 / 2000 N m/rad
Rendimiento	85% / 98%

Se buscan reductores de bajo peso, reducido tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una **reducción elevada de velocidad en un único paso**. Se tiende también a **minimizar su momento de inercia**, de negativa influencia en el funcionamiento del motor, especialmente crítico en el caso de motores de baja inercia.

Los reductores, por motivos de diseño, tienen una **velocidad máxima admisible**, que como regla general aumenta a medida que disminuye el tamaño del motor. También existe una limitación en cuanto al **par de entrada nominal** permisible (T_2) que depende del par de entrada (T_1) y de la relación de transmisión a través de la relación:

$$T_2 = R T_1 (w_1 / w_2)$$

Donde el rendimiento, R, puede llegar a ser cerca del 100%, y la relación de reducción de velocidades (w_1 = velocidad de entrada; w_2 = velocidad de salida) varía entre 50 y 300.

Puesto que los robots trabajan en ciclos cortos, que implican continuos arranques y paradas, es de gran importancia que el reductor sea capaz de soportar **pares elevados puntuales**. También se busca que el **juego angular** sea lo menor posible. Éste se define como el ángulo que gira al eje de salida cuando se cambia su sentido de giro sin que llegue a girar al eje de entrada. Por último, es importante que los reductores para robótica posean una **rigidez torsional**, definida como el par que hay que aplicar sobre el eje de salida para que, manteniendo bloqueado el de entrada, aquél gire un ángulo unidad.

9. Actuadores

Los actuadores tienen como misión generar el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la unidad de control. Se clasifican en tres grandes grupos, según la energía que utilizan:

- Neumáticos
- Hidráulicos
- Eléctricos

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. Más tarde se proporcionará una 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

❖ **Actuadores neumáticos**

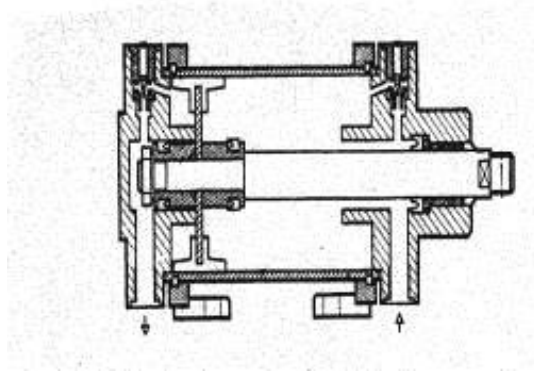
En ellos la fuente de energía es aire a presión entre 5 y 10 bar. Existen dos tipos de actuadores neumáticos:

- 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).

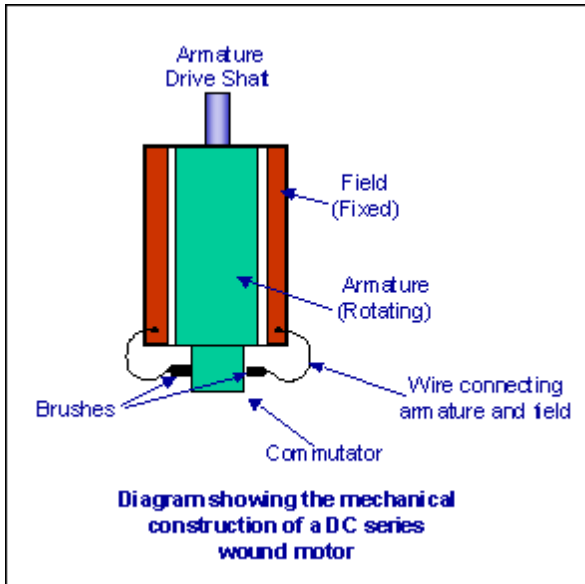
❖ **Actuadores eléctricos**

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. 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.

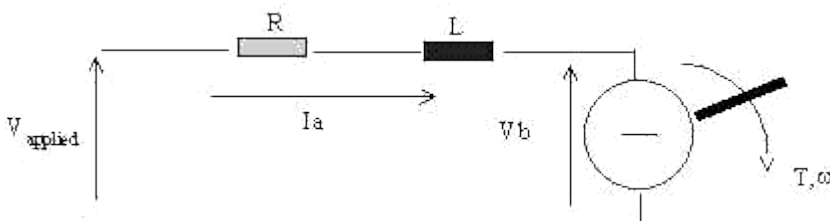
Los motores de DC están constituidos por dos devanados internos, inductor e inducido, que se alimentan con corriente continua:

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**.

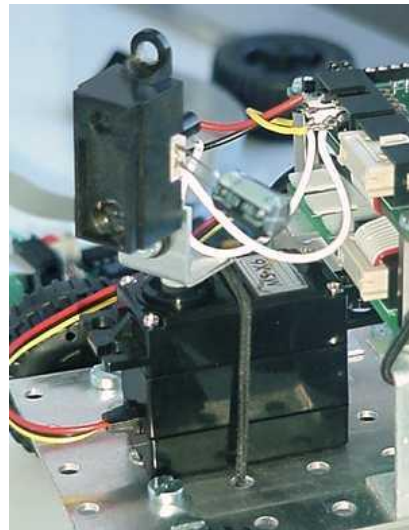
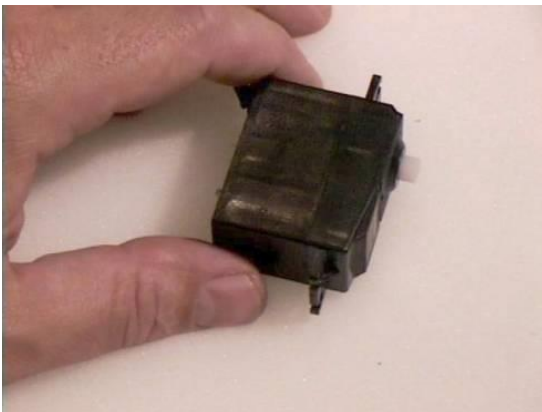
Sobre este bucle de velocidad se coloca otro de posición, en el que las referencias son generadas por la unidad de control (microprocesador) sobre la base del error entre la posición deseada y la real.

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.

Servomotores

Los servos son un tipo especial de motor de c.c. que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata en cualquier posición dentro de su intervalo de operación. Para ello, el servomotor espera un tren de pulsos que se corresponde con el movimiento a realizar. Están generalmente formados por un amplificador, un motor, un sistema reductor formado por ruedas dentadas y un circuito de realimentación, todo en un misma caja de pequeñas dimensiones. El resultado es un servo de posición con un margen de operación de 180° aproximadamente.



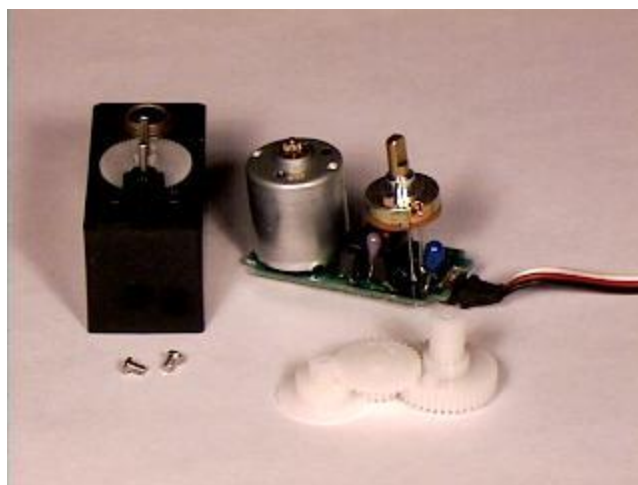
Se dice que el servo es un dispositivo con un eje de rendimiento controlado ya que puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que exista una señal codificada en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia.

En la práctica, se usan servos para posicionar elementos de control como palancas, pequeños ascensores y timones. También se usan en radio-control, marionetas y, por supuesto, en robots. Los Servos son sumamente útiles en robótica. Los motores son pequeños. Un motor como el de las imágenes superiores posee internamente una circuitería de control y es sumamente potente para su tamaño. Un servo normal o estándar como el HS-300 de Hitec proporciona un par de 3 kg·cm a 4.8 V, lo cual es bastante para su tamaño, sin consumir mucha energía. La corriente que requiere depende del tamaño del servo. Normalmente el fabricante indica cual es la corriente que consume. Eso no significa mucho si todos los servos van a estar moviéndose todo el tiempo. La corriente depende principalmente del par, y puede exceder un amperio si el servo está enclavado.

Composición del servo

En la siguiente figura se muestra la composición interna de un servomotor. Se puede observar el motor, la circuitería de control, un juego de piñones, y la caja. También se pueden ver los **3 cables de conexión externa**:

- uno (rojo) es para **alimentación**, V_{cc} ($\sim +5$ volts);
- otro (negro) para conexión a **tierra** (GND);
- el último (blanco o amarillo) es la línea de **control** por la que se le envía la señal codificada para comunicar el ángulo en el que se debe posicionar.



Sevomotor desmontado



Detalle del tren de engranajes



Detalle del circuito de realimentación

El motor del servo tiene algunos circuitos de control y un potenciómetro conectado al eje central del motor. En la figura superior se puede observar a la derecha. Este potenciómetro permite a la circuitería de control, supervisar el ángulo actual del servo motor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor está apagado. Si el circuito chequea que el ángulo no es correcto, el motor volverá a la dirección correcta, hasta llegar al ángulo que es correcto. El eje del servo es capaz de llegar alrededor de los 180 grados. Normalmente, en algunos llega a los 210 grados, pero varía según el fabricante.

Un servo normal se usa para controlar un movimiento angular de entre 0 y 180 grados. Un servo normal no es mecánicamente capaz de retornar a su lugar, si hay un mayor peso que el sugerido por las especificaciones del fabricante.

El voltaje aplicado al motor es proporcional a la distancia que éste necesita viajar. Así, si el eje necesita regresar una distancia grande, el motor regresará a toda velocidad. Si este necesita regresar sólo una pequeña cantidad, el motor girará a menor velocidad. A esto se le denomina **control proporcional**.

Funcionamiento del servo. Control PWM

La modulación por anchura de pulso, **PWM** (*Pulse Width Modulation*), es una de los sistemas más empleados para el control de servos. Este sistema consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está a nivel alto, manteniendo el mismo período (normalmente), con el objetivo de modificar la posición del servo según se desee.

Para la generación de una onda PWM en un microcontrolador, lo más habitual es usar un *timer* y un **comparador** (interrupciones asociadas), de modo que el microcontrolador quede libre para realizar otras tareas, y la generación de la señal sea automática y más efectiva. El mecanismo consiste en programar el *timer* con el ancho del pulso (el período de la señal) y al comparador con el valor de duración del pulso a nivel alto. Cuando se produce una interrupción de *overflow* del *timer*, la subrutina de interrupción debe poner la señal PWM a nivel alto y cuando se produzca la interrupción del comparador, ésta debe poner la señal PWM a nivel bajo. En la actualidad, muchos microcontroladores, como el 68HC08, disponen de hardware específico para realizar esta tarea, eso sí, consumiendo los recursos antes mencionados (*timer* y comparador).

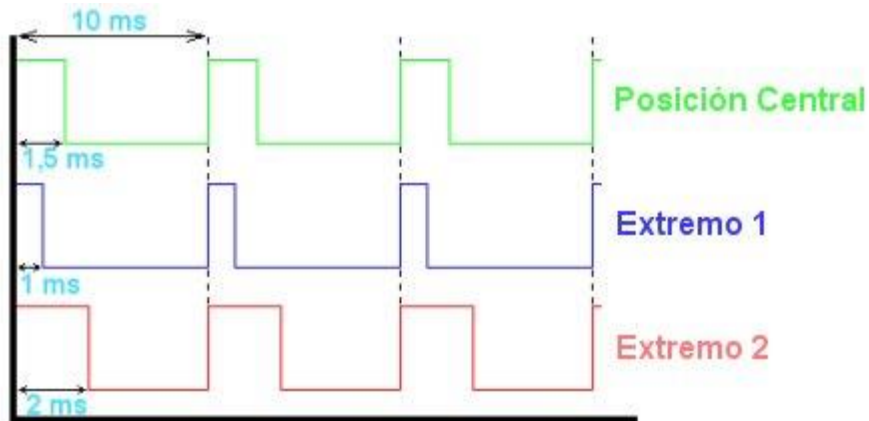


PWM para recorrer todo el rango de operación del servo

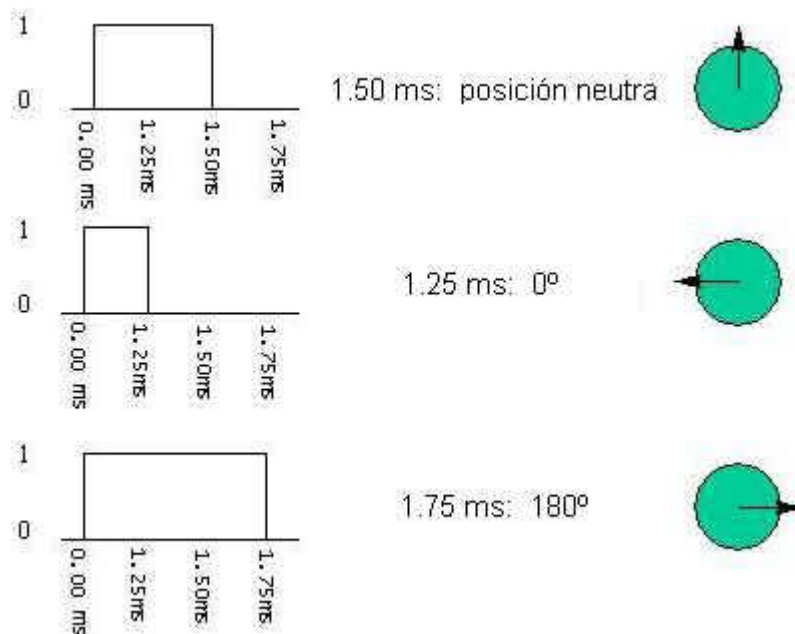
El sistema de control de un servo se limita a indicar en qué posición se debe situar. Esto se lleva a cabo mediante una serie de pulsos tal que la duración del pulso indica el ángulo de giro del motor. Cada servo tiene sus márgenes de operación, que se corresponden con el ancho del pulso máximo y mínimo que el servo entiende. Los valores más generales se corresponden con pulsos de entre 1 ms y 2 ms de anchura, que dejarían al motor en ambos extremos (0° y 180°). El valor 1.5 ms indicaría la posición central o neutra (90°), mientras que otros valores del pulso lo dejan en posiciones intermedias. Estos valores suelen ser los recomendados, sin embargo, es posible emplear pulsos menores de 1 ms o mayores de 2 ms, pudiéndose conseguir ángulos mayores de 180° . Si se sobrepasan los límites de movimiento del servo, éste comenzará a emitir un zumbido, indicando que se debe cambiar la longitud del pulso. El factor limitante es el tope del potenciómetro y los límites mecánicos constructivos.

El período entre pulso y pulso (tiempo de OFF) no es crítico, e incluso puede ser distinto entre uno y otro pulso. Se suelen emplear valores ~ 20 ms (entre 10 ms y 30 ms). Si el intervalo entre pulso y pulso es inferior al mínimo, puede interferir con la temporización interna del servo, causando un zumbido, y la vibración del eje de salida. Si es mayor que el máximo, entonces el servo pasará a estado dormido entre pulsos. Esto provoca que se mueva con intervalos pequeños.

Es importante destacar que para que un servo se mantenga en la misma posición durante un cierto tiempo, es necesario enviarle continuamente el pulso correspondiente. De este modo, si existe alguna fuerza que le obligue a abandonar esta posición, intentará resistirse. Si se deja de enviar pulsos (o el intervalo entre pulsos es mayor que el máximo) entonces el servo perderá fuerza y dejará de intentar mantener su posición, de modo que cualquier fuerza externa podría desplazarlo.



Tren de pulsos para control del servo



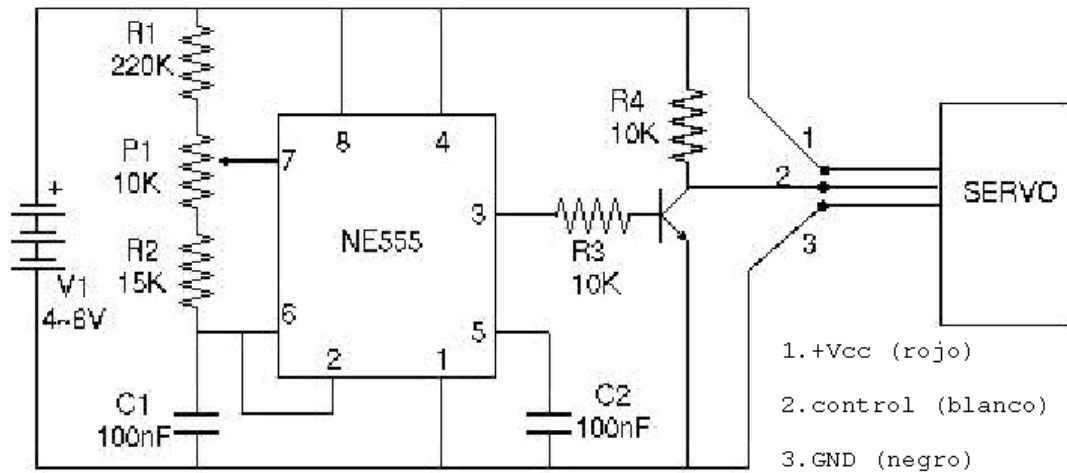
Otra posibilidad de pulsos de control

Observaciones:

- Lo que hacen algunos es quitar el tope mecánico que llevan las reductoras en alguna corona y cambiar el potenciómetro (que aquí actúa como sensor para indicar la posición en la que está el motor) por un par de resistencias fijas para "engañar" a la electrónica haciéndole ver que no ha alcanzado aún la posición deseada, con lo que el pobre motor, siguiendo esa consigna, gira y gira intentando llegar a la posición, que no se da cuenta que alcanza. Se supone (es que esto no lo he probado) que el control que llevan los servos está preparado de tal manera que cuando se determina llegar a una posición cercana la velocidad es baja. Por el contrario, si se indica una posición que queda lejos de la actual, lo hace más rápidamente. Así puedes "ajustar" la velocidad de los motores.
- Otra de las grandes utilidades del PWM es la de gestionar la velocidad de cualquier tipo de motor, sin ningún tipo de electrónica, (salvo para la etapa de potencia, que se puede utilizar algún transistor MOSFET de potencia, como el BUK10 ó el BUK11, con los que podemos controlar poniendo la salida del micro, directamente a la puerta del MOSFET. Ambos TRT gestionan mas de 20 Amperios, con unas resistencias de canal de 0.03. Para mejorar el rendimiento se coloca una resistencia entre el surtidor y la puerta de 1K, para descargar la carga parásita). El principio es el siguiente, si tu alimentas un motor con una señal de pulsos de suficiente frecuencia, el motor no nota las variaciones (actúa como un filtro) y saca un giro constante. La gracia, es que variando el % de tiempo de la señal rectangular en alta, y en baja, variamos la potencia que le entregamos al motor, con lo que controlamos la velocidad de giro con mucha precisión. Nota: Si el micro lo permite, a mayor frecuencia de PWM, mejor rendimiento saca el motor.

Circuito *driver* del Servo

La que se proporciona aquí es una versión. Puede usarse para jugar con servos, para verificar que funcionan, o para conectarle servos a un Robot. Lo primero para este montaje es encontrar los pulsos requeridos con un osciloscopio para programarlo en un microcontrolador.



Se usa un integrado "Timer" 555. El nombre usual es NE555 o LM555, pero casi todos fabricantes de IC's lo han hecho. A veces también es listado como 7555. Este circuito se encuentra en las hojas de datos de los manuales ECG, National, Motorola u otros, con los valores de resistencias/condensadores calculados con las fórmulas precisas. La única diferencia es la presencia del potenciómetro P1, que cambia el tiempo cuando se gira..

La señal de salida del 555 (pin3) tiene polaridad opuesta. Para invertirla, es necesario el transistor. Éste se conecta en configuración "colector común" y se usa en modo de saturación. Se podría usar cualquier transistor NPN de baja señal para trabajar sin problemas (por ejemplo, un C1959Y).

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.

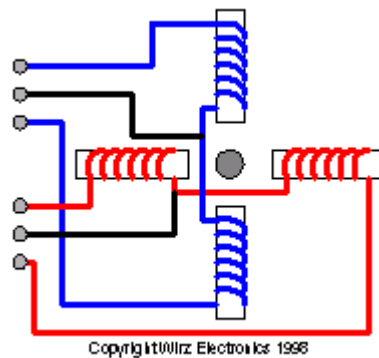
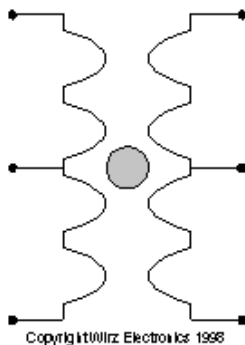
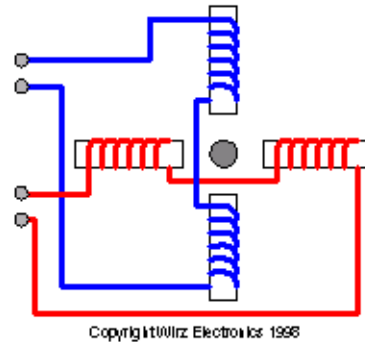
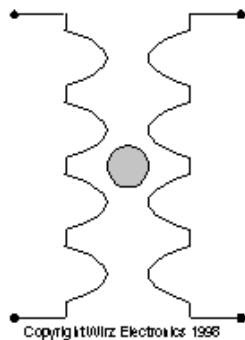
En los motores de **reluctancia variable**, el rotor está formado por un material ferromagnético que tiende a orientarse de modo que facilite el camino de las líneas de fuerza del campo magnético generado por las bobinas de estator. No contiene, por tanto, imanes permanentes. El estator es similar a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

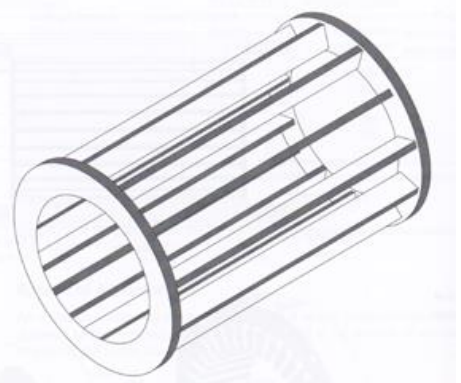
- la construcción de los motores síncronos sin escobillas.
- el uso de convertidores estáticos que permiten variar la frecuencia (y así la velocidad de giro) con facilidad y precisión.
- el empleo de la microelectrónica, que permite una gran capacidad de control.

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 el 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.

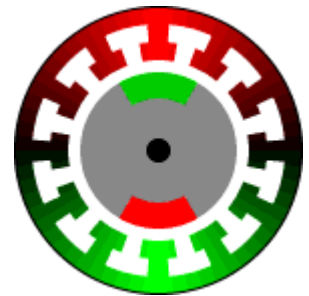


La frecuencia de la corriente alterna de la alimentación determina la velocidad a la cual rota el campo magnético del estator. El rotor sigue a este campo, girando más despacio. La diferencia de velocidades se denomina deslizamiento. La imagen adjunta exagera el deslizamiento. Si se sitúa el puntero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

- **Motores síncronos**

El motor síncrono, como su nombre indica, opera exactamente a la misma velocidad que el 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 Fiables 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

10. Sensores

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

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

Entre los sensores internos se encuentran estos diferentes tipos:

- de posición
- de velocidad
- de presencia

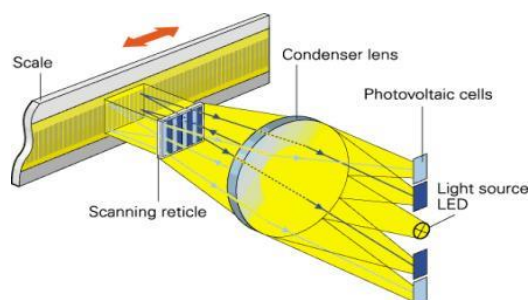
Sensores de posición

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 fotorreceptores. 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 atraviese 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 aumentara así su resolución, multiplicándola por N.

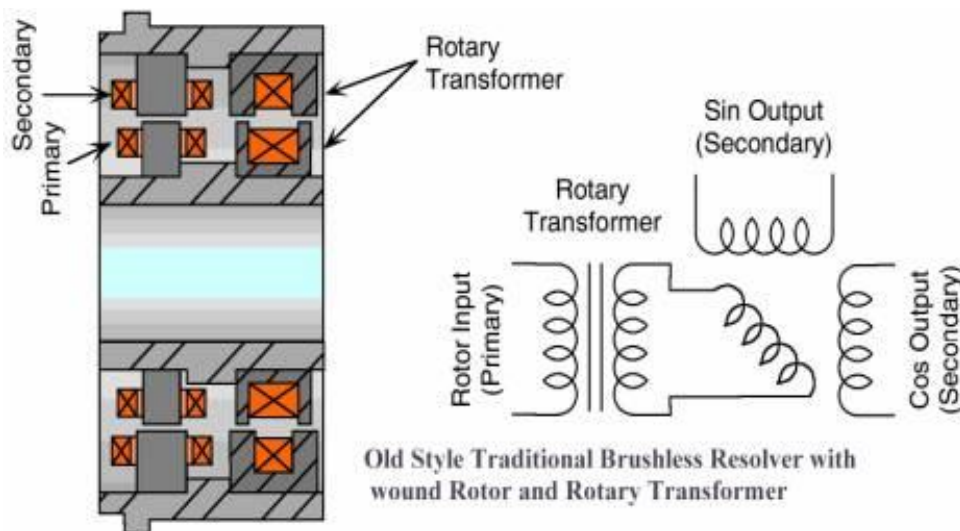
En algunos **encoders** absolutos se utiliza otro *encoder* absoluto más pequeño conectado por un engranaje reductor al principal, de manera que cuando éste gire una vuelta completa, el codificado adicional avanzará una posición. Son los denominados **encoder absolutos multivuelta**.

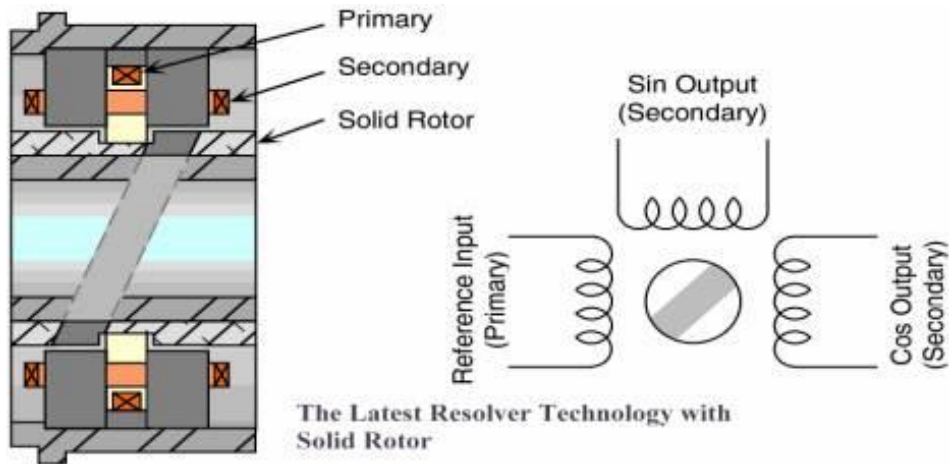
Esta misma circunstancia originará que en el caso de los codificadores incrementales la señal de referencia o marca de cero, sea insuficiente para detectar el punto origen para la cuenta de pulsos, pues habrá N posibles puntos de referencia para un giro completo de la articulación. Para distinguir cuál 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.



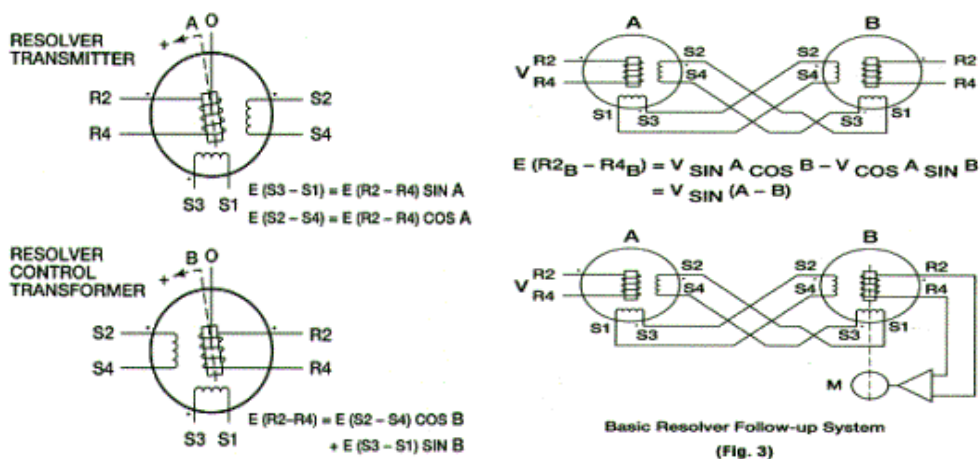


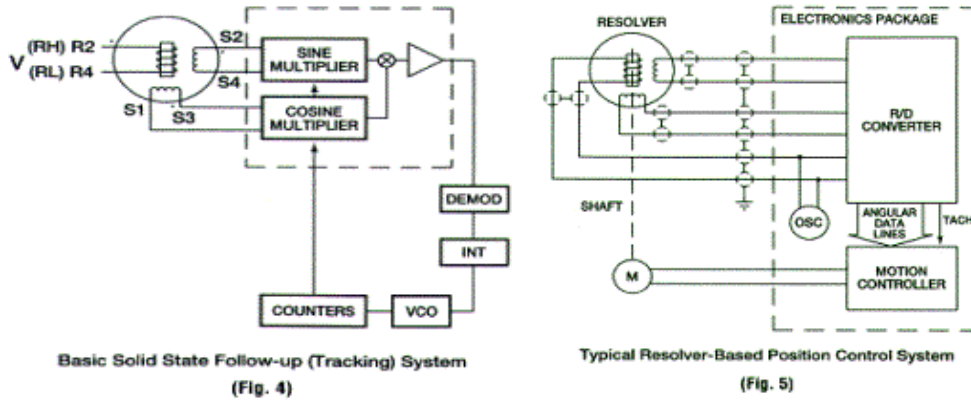
El giro de la bobina móvil hace que el acoplamiento con las bobinas fijas varíe, consiguiendo que la señal resultante en éstas dependa del seno del ángulo de giro. La bobina móvil excitada con tensión $V \sin(\omega t)$ y girada un ángulo θ induce en las bobinas fijas situadas en cuadratura las siguientes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



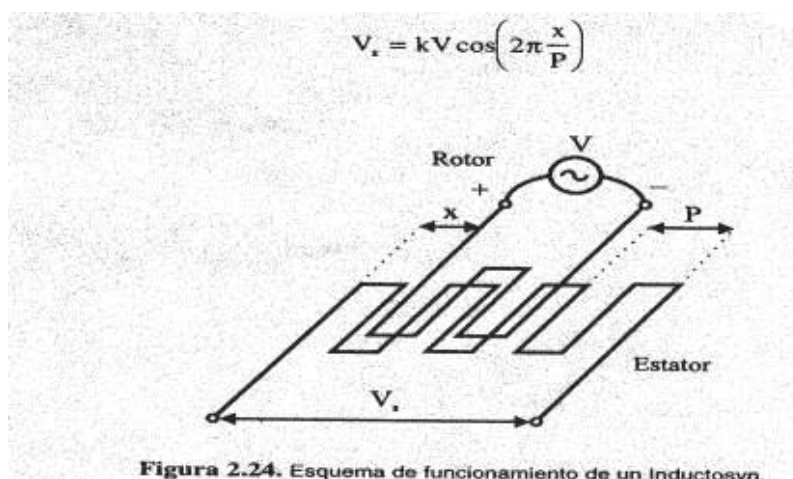
- **Sensores lineales de posición (LVDT)**

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. 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.

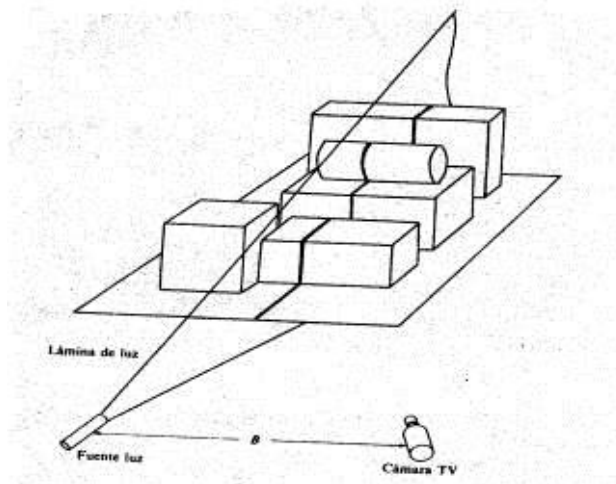
Los sensores de fuerza y torsión se utilizan como dispositivos de retroalimentación para controlar la manipulación de un objeto una vez que haya agarrado.

- 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 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 tránsito 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 una ordenadora.

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, 632.8nm 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 $f = 10\text{Mhz}$ 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.

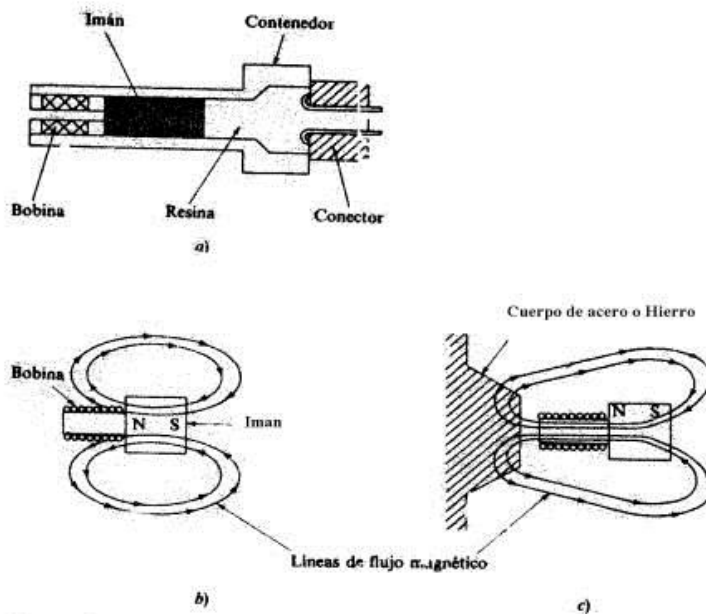


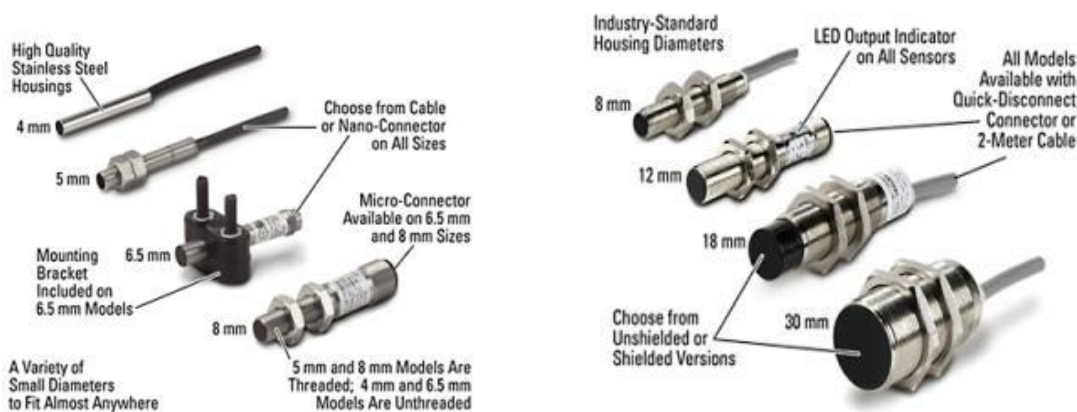
Figura 6.8 a) Un sensor inductivo. b) Forma de las líneas de flujo en la ausencia de un cuerpo ferromagnético. c) Formas de las líneas de flujo cuando un cuerpo ferromagnético se lleva a las proximidades del sensor.

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.

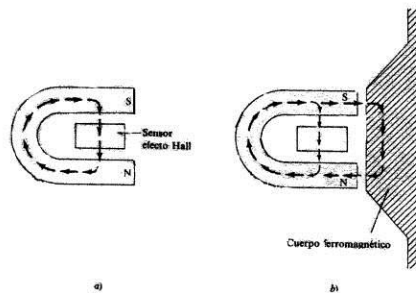


Figura 6.10 Funcionamiento de un sensor de efecto Hall en conjunción con un imán permanente. (Adaptado de Canali [1981a]. © Società Italiana di Fisica.)

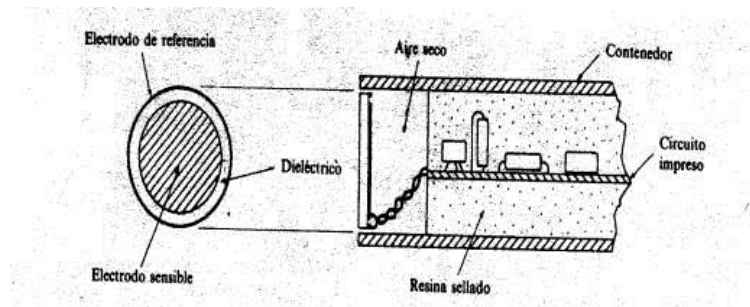
Cuando dicho material se lleva a la proximidad del dispositivo, el campo magnético se debilita en el sensor debido a la curvatura de las líneas del campo a través del material. Los sensores de efecto Hall están basados en el principio de una fuerza de Lorentz que actúa sobre una partícula cargada que 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 $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$, 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.

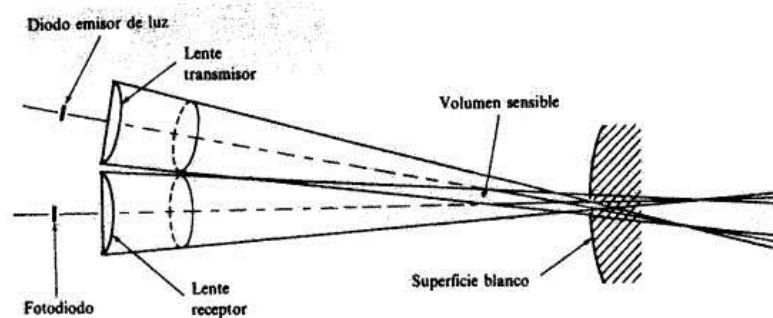


Figura 6.16 Sensor de proximidad óptico.

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.

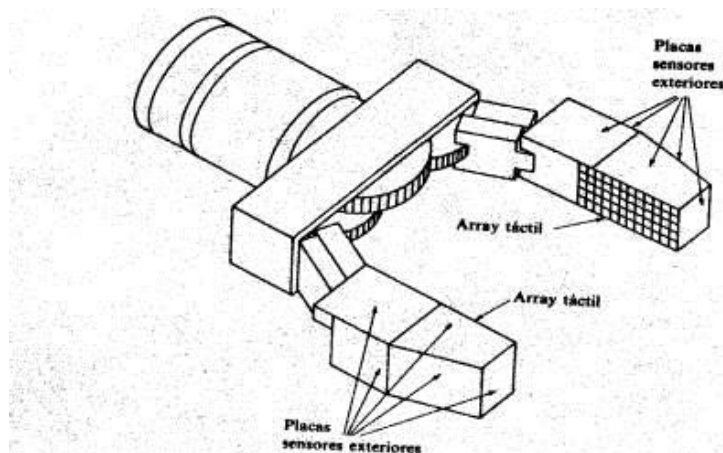


Figura 6.19 Un robot provisto de arrays sensores táctiles.

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

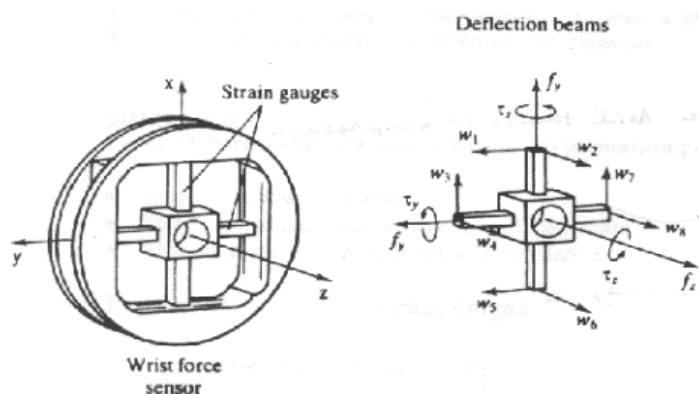
Los sensores de fuerza y de torsión se utilizan principalmente para medir las fuerzas de reacción desarrolladas en la superficie de separación entre conjuntos mecánicos. Los métodos principales para realizar esta operación son los de detección de articulación y muñeca. Un sensor de articulación mide 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 (aproximadamente 12 onzas) y de un diseño relativamente compacto, del orden de 10 cm de diámetro total y de 3cm de espesor.

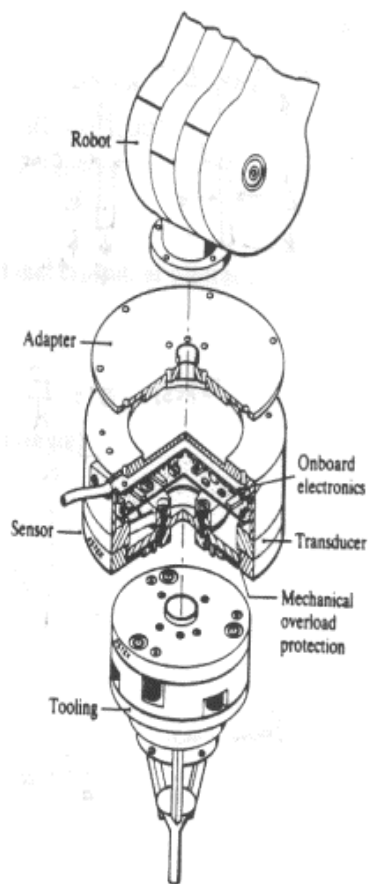
Para poder reducir la histéresis y aumentar la exactitud en la medida, el *hardware* se suele construir a partir de una pieza mecánica maciza, que suele ser de aluminio. Por ejemplo, el sensor mostrado en la figura utiliza ocho pares de galgas de deformaciones de semiconductores montadas en cuatro barras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

11. Elementos terminales o actuadores finales

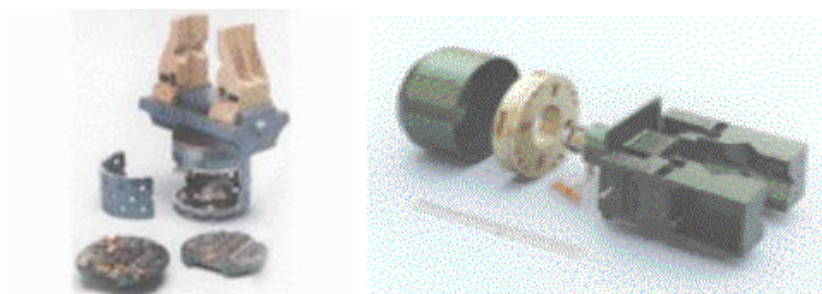
❖ Introducción

Para las aplicaciones industriales, las capacidades del robot básico deben aumentarse por medio de dispositivos adicionales. Podríamos denominar a estos dispositivos como los periféricos del robot. En robótica, el término de actuador final se utiliza para describir la mano o herramienta que está unida a la muñeca. El actuador final representa la herramienta especial que permite al robot de uso general realizar una aplicación particular, y debe diseñarse específicamente para dicha aplicación.

Los actuadores finales pueden dividirse en dos categorías:

- pinzas (*gripper*)
- herramientas

Las pinzas se utilizan para tomar un objeto, normalmente la pieza de trabajo, y sujetarlo durante el ciclo de trabajo del robot. Hay una diversidad de métodos de sujeción que pueden utilizarse, además de los métodos mecánicos obvios de agarre de la pieza entre dos o más dedos. Estos métodos suplementarios incluyen el empleo de casquetes de sujeción, imanes, ganchos, y cucharas.



Una herramienta se utiliza como actuador final en aplicaciones en donde se exija al robot realizar alguna operación sobre la pieza de trabajo. Estas aplicaciones incluyen la soldadura por puntos, la soldadura por arco, la pintura por pulverización y las operaciones de taladro. En cada caso, la herramienta particular está unida a la muñeca del robot para realizar la operación.



Pinzas (*gripper*)

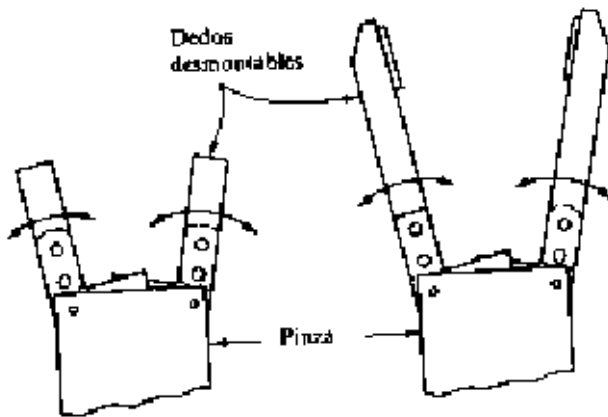
Los elementos de sujeción se utilizan para agarrar y sostener los objetos, y se suelen denominar pinzas. Se distingue entre las que utilizan dispositivos de agarre mecánico y las que utilizan algún otro tipo de dispositivo (ventosas, pinzas magnéticas, adhesivas, ganchos, etc.). Se pueden clasificar según el sistema de sujeción empleado.

Sistemas de sujeción para robots		
Tipo	Accionamiento	Uso
Pinza de presión - des. angular - des. lineal	Neumático o eléctrico	Transporte y manipulación de piezas sobre las que no importé presionar
Pinza de enganche	Neumático o eléctrico	Piezas grandes dimensiones o sobre las que no se puede ejercer presión
Ventosa de vacío	Neumático	Cuerpos con superficie lisa poco porosa (cristal, plástico etc.)
Electroimán	Eléctrico	Piezas ferromagnéticas

El accionamiento neumático es el más utilizado por ofrecer mayores ventajas en simplicidad, precio y fiabilidad, aunque presenta dificultades de control de posiciones intermedias. En ocasiones se utilizan accionamientos de tipo eléctrico.

En la pinza se suelen situar sensores para detectar el estado de la misma (abierto o cerrado). Se pueden incorporar a la pinza otro tipo de sensores para controlar el estado de la pieza, sistemas de visión que incorporen datos geométricos de los objetos, detectores de proximidad, sensores fuerza par, etc.

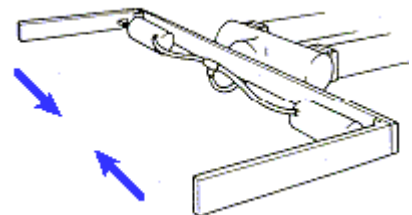
Existen ciertos elementos comerciales que sirven de base para la pinza, siendo posible a partir de ellos diseñar actuadores válidos para cada aplicación concreta. Sin embargo, en otras ocasiones el actuador debe ser desarrollado íntegramente, constituyendo un



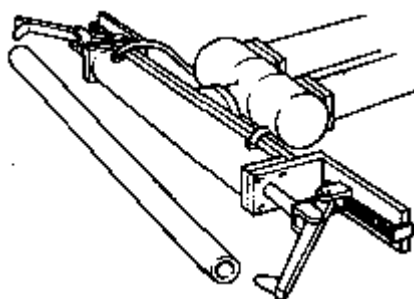
porcentaje importante dentro del coste total de la aplicación.

Los tipos de pinzas más comunes pertenecen al tipo llamado **pivotante**. Los dedos de la pinza giran en relación con los puntos fijos del pivote. De esta manera, la pinza se abre y se cierra.

Otro tipo de pinzas se denominan de **movimiento lineal**. En este caso, los dedos se abren y se cierran ejecutando un movimiento paralelo entre sí.

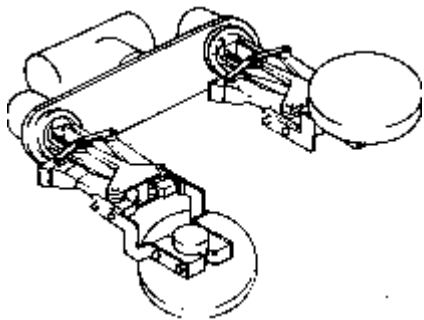
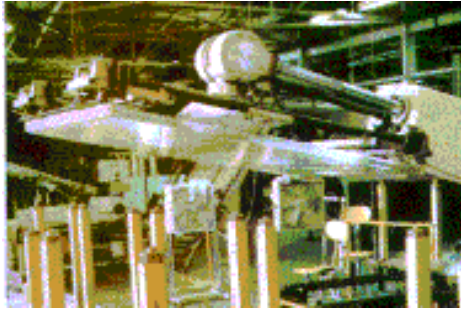


En la elección o diseño de una pinza se han de tener en cuenta diversos factores. Entre los que afectan al tipo de objeto y de manipulación a realizar destacan el peso, la forma, el tamaño del objeto y la fuerza que es necesario ejercer y mantener para sujetarlo. Entre los parámetros de la pinza cabe destacar su peso (que afecta a las inercias del robot), el equipo de accionamiento y la capacidad de control.



Una regla general es que la pinza debe sujetar a la pieza de trabajo por su centro de gravedad; esto ocasiona que

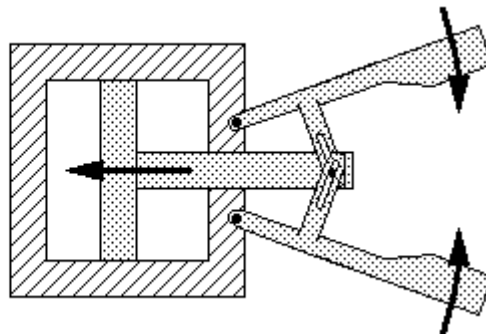
se anulen los momentos que se pudieran generar por el peso de la pieza de trabajo.



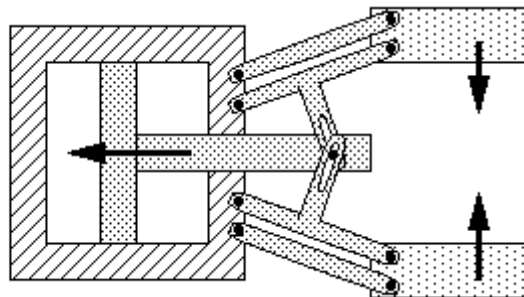
Para reducir los tiempos de ciclo en operaciones de carga y descarga de piezas a máquinas-herramientas se pueden diseñar actuadores finales con doble pinza.

Existen otros tipos de pinzas como ventosas, pinzas magnéticas y pinzas adhesivas.

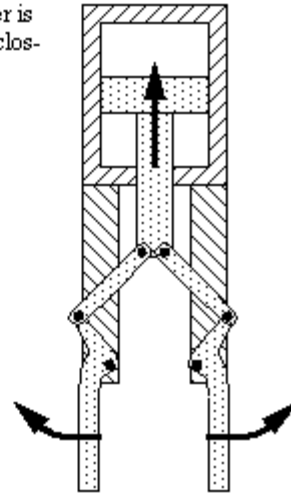
Two Finger Gripper - as the pneumatic cylinder is actuated, the fingers move together and apart.



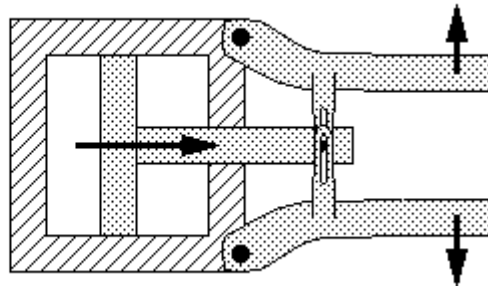
Parallel finger actuator - as the cylinder is actuated, the fingers move together and apart in parallel.



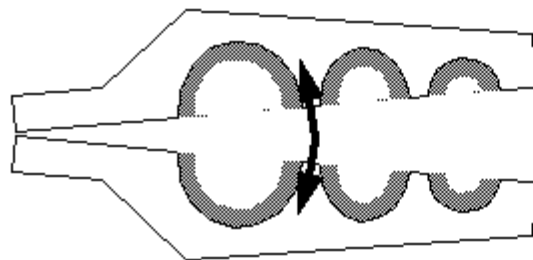
Two Fingered Pneumatic Actuated - as the cylinder is actuated, it translates to the fingers opening or closing. The extra links help increase holding force.



Two Finger Internal Gripper - as the cylinder is actuated, the fingers move outward.



Self Aligning Finger Pads - small rocking pads are placed on the end fingers, these are also covered with a high friction material, such as rubber. These allow some locational inaccuracy when grasping parts.

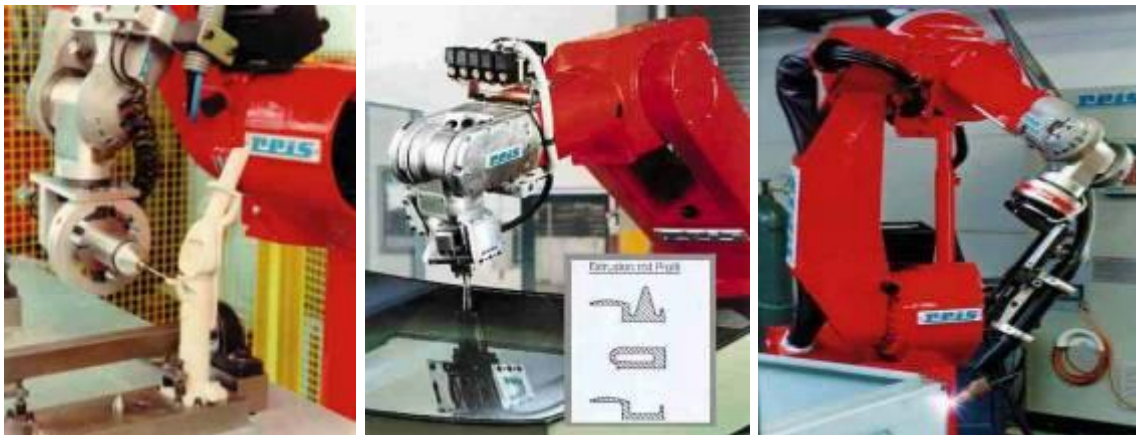


Multiple Part Gripper - the gripper has a number of holes cut for different parts. In this case the gripper can hold three different radii, and the rubber lining will help hold the part.

❖ Herramientas

En muchas ocasiones el robot ha de realizar operaciones que no consisten en manipular objetos, sino que implica el uso de una herramienta. Aparte de estos elementos de sujeción y herramientas más o menos convencionales, existen interesantes desarrollos e investigaciones, muchos de ellos orientados a la manipulación de objetos complicados y delicados. Por ejemplo pinzas dotadas de tacto.

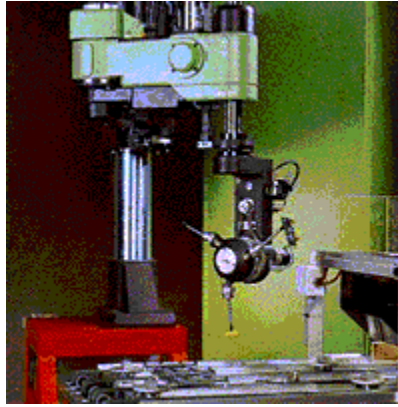
Herramientas terminales para robots	
Tipo	Comentarios
Pinza soldadura por puntos	Dos electrodos que se cierran sobre la pieza de soldar
Soplete soldadura de arco	Aportan el flujo de electrodo que se funde
Cucharón para colada	Para trabajos de fundición
Atornillador	Suelen incluir la alimentación de tornillos
Fresa-lijas	Para perfilar, eliminar rebabas, pulir, etc
Pistola de pintura	Para pulverización de la pintura
Cañón láser	Para corte de materiales, soldadura o inspección
Cañón de agua a presión	Para corte de materiales



Diferentes robots para la manipulación de objetos complicados y delicados



El robot que aparece en la figura adjunta tiene un dispositivo en su muñeca para aplicaciones de soldadura.



En este robot el actuador final consiste de una serie de sensores que puede tener diversas aplicaciones (medición, inspección).

12. Aplicaciones de la Robótica

❖ Clasificación

En la actualidad los robots se usan de manera extensa en la industria, siendo un elemento indispensable en una gran parte de los procesos de manufactura. Impulsados principalmente por el sector del automóvil, los robots han dejado de ser máquinas misteriosas propias de la ciencia-ficción para ser un elemento más de muchos de los talleres y líneas de producción.

Por su propia definición el **robot industrial** es multifuncional, esto es, puede ser aplicado a un número, en principio ilimitado, de funciones. No obstante, la práctica ha demostrado que su adaptación es óptima en determinados procesos (soldadura, paletización, etc.) en los que hoy día el robot es sin duda alguna, la solución más rentable.

Junto con estas aplicaciones, ya arraigadas, hay otras novedosas en las que si bien la utilización del robot no se realiza a gran escala, si se justifica su aplicación por las condiciones intrínsecas del medio de trabajo (ambientes contaminados, salas asépticas, construcción, etc.) o la elevada exigencia en cuanto a calidad de los resultados (medicina, etc.). Estos robots se han venido llamando **robots de servicio**.

La Federación Internacional de la Robótica (IFR) estableció en 1998 una clasificación de las aplicaciones de la Robótica en el sector manufacturero:

- Manipulación en fundición
 - Moldes
 - Otros
- Manipulación en moldeo de plásticos
- Manipulación en tratamientos térmicos
- Manipulación en la forja y estampación
- Soldadura.
 - Por arco
 - Por puntos
 - Por gas
 - Por láser
 - Otros
- Aplicación de materiales
 - Pintura
 - Adhesivos y secantes
 - Otros
- Mecanización
 - Carga y descarga de máquinas
 - Corte mecánico, rectificado, desbardado y pulido
 - Otros
- Otros procesos
 - Láser
 - Chorro de agua
 - Otros
- Montaje.
 - Montaje mecánico
 - Inserción
 - Unión por adhesivos
 - Unión por soldadura
 - Manipulación para montaje
 - Otros



- Paletización
- Medición, inspección, control de calidad
- Manipulación de materiales
- Formación, enseñanza e investigación
- Otros



Esta clasificación pretende englobar la mayor parte de los procesos robotizados en la actualidad aunque, como se ha indicado anteriormente, se pueden encontrar aplicaciones particulares que no aparecen de manera explícita en esta clasificación.

❖ **Aplicaciones Industriales**

La implantación de un robot industrial en un determinado proceso exige un detallado estudio previo del proceso en cuestión, examinando las ventajas e inconvenientes que conlleva la introducción del robot. Será preciso siempre estar dispuesto a admitir cambios en el desarrollo del proceso primitivo (modificaciones en el diseño de piezas, sustitución de unos sistemas por otros, etc.) que faciliten y hagan viable la aplicación del robot.

Trabajos en fundición

- **Aplicación de sellantes y adhesivos**
- **Alimentación de máquinas**
- **Procesado**
- **Corte**
- **Montaje**
- **Paletización**
- **Control de calidad**
- **Manipulación en salas blancas**
- **Soldadura**
- **Aplicación de materiales**

La fundición por inyección fue el primer proceso robotizado (1960). En este proceso el material usado, en estado líquido, es inyectado a presión en el molde. Este último está formado por dos mitades que se mantienen unidas durante la inyección del metal mediante la presión ejercida por dos cilindros. La pieza solidificada se extrae del molde y se enfría para su posterior desbaldado. El molde, una vez limpio de residuos de restos de metal y adecuadamente lubricado, puede ser usado de nuevo.



Diferentes formas de uso del robot en aplicaciones industriales

El robot se usa en:

- la fundición de las piezas del molde y transporte de éstas a un lugar de enfriado y posteriormente a otro proceso (desbaldado, corte, etc.).
- la limpieza y mantenimiento de los moldes, eliminando rebabas (por aplicación de aire comprimido) y aplicando el lubricante.
- la colocación de piezas en el interior de los moldes (embutidos).

Las cargas manejadas por los robots en estas tareas suelen ser medias o altas (del orden de decenas de kilogramos), no se necesita una gran precisión y su campo de acción ha de ser grande. Su estructura más frecuente es la polar y la articular y su sistema de control es por lo general sencillo.

Soldadura

La industria automovilística ha sido la gran impulsora de la robótica industrial, empleando la mayor parte de los robots instalados hoy día. La tarea robotizada más frecuente dentro de la fabricación de automóviles ha sido, sin duda alguna, la soldadura de carrocerías. En



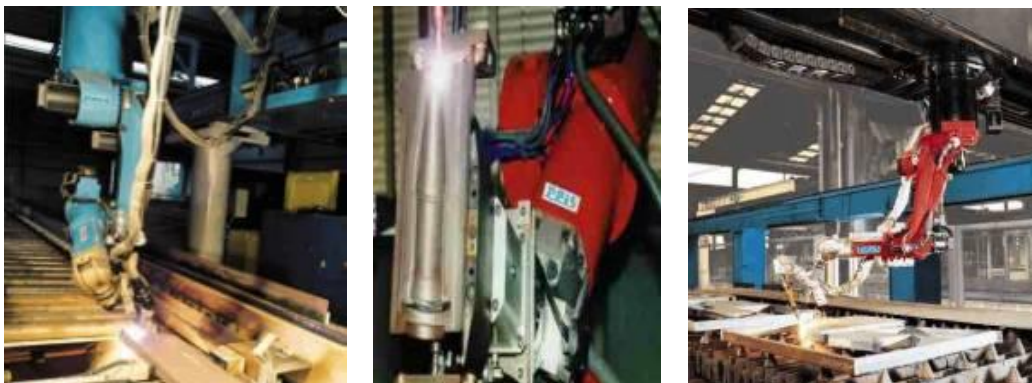
este proceso, dos piezas metálicas se unen en un punto para la fusión conjunta de ambas partes, denominándose a este tipo de soldadura por puntos.

Para ello, se hace pasar una corriente eléctrica elevada y a baja tensión a través de dos electrodos enfrentados entre los que se sitúan las piezas a unir. Los electrodos instalados en una pinza de soldadora, deben sujetar las piezas con una presión determinada (de lo que depende la precisión de la soldadura). Además deben ser controlados los niveles de tensión e intensidad necesarios, así como el tiempo de aplicación. Todo ello exige el empleo de un sistema de control del proceso de soldadura.



La robotización de la soldadura por puntos admite dos soluciones: el robot transporta la pieza presentando ésta a los electrodos que están fijos, o bien, el robot transporta la pinza de soldadura posicionando los electrodos en el punto exacto de la pieza en la que se desea realizar la soldadura. El optar por uno u otro método depende del tamaño, peso y manejabilidad de las piezas.

En las grandes líneas de soldadura de carrocerías de automóviles, éstas pasan secuencialmente por varios robots dispuestos frecuentemente formando un pasillo; los robots, de una manera coordinada, posicionan las piezas de soldadura realizando varios puntos consecutivamente.



La gran demanda de robots para la tarea de soldadura por puntos ha originado que los fabricantes desarrollen robots especiales para esta aplicación que integran en su sistema de programación el control de la pinza de soldadura que portan en su extremo. Los robots de soldadura por puntos precisan capacidad de cargas del orden de los 50-100 Kg. y estructura articular, con suficientes grados de libertad (5 o 6) para posicionar y orientar la pinza de soldadura (o pieza según el caso) en lugares de difícil acceso.

Aplicación de materiales

El acabado de superficies por recubrimiento de un cierto material (pintura, esmalte, partículas de metal, etc.) con fines decorativos o de protección, es una parte crítica en muchos procesos de fabricación.

Tanto en la pintura como en el metalizado, esmaltado o arenado, la problemática a resolver es similar, siendo la primera la que cuenta con mayor difusión. Su empleo está generalizado en la fabricación de automóviles, electrodomésticos, muebles, etc.



En estos procedimientos se cubre una superficie (de forma tridimensional y en general complicada) con una mezcla de aire y material pulverizada mediante una pistola. Es preciso conseguir una perfecta homogeneidad en el reparto de la pintura, realizándose para ello un control de la viscosidad, de la distancia entre las piezas y la pistola, de la velocidad de movimiento de ésta, del número de pasadas etc. Todos estos parámetros son tradicionalmente controlados por el operario.

Por otra parte el entorno en el que se realiza la pintura es sumamente desagradable y peligroso. En él se tiene simultáneamente un reducido espacio, una atmósfera tóxica, un alto nivel de ruido y un riesgo de incendio. Estas circunstancias han hecho de la pintura y operaciones afines, un proceso de interesante robotización. Con el empleo del robot se eliminan los inconvenientes ambientales y se gana en cuanto a homogeneidad en la calidad del acabado, ahorro de pintura y productividad.

Normalmente los robots de pintura son específicos para este fin. Suelen ser robots articulares, ligeros, con 6 o más grados de libertad que les permiten proyectar pintura en todos los huecos de la pieza. Cuentan con protecciones especiales para defenderse de las partículas en suspensión dentro de la cabina de pintura y sus posibles consecuencias (explosiones, incendio, deterioro mecánico). Este mismo motivo origina que, en muchos casos, el accionamiento de los robots de pintura sea hidráulico o, de ser eléctrico, que los cables vayan por el interior de conductos a sobrepresión, evitándose así, el riesgo de explosión.

Tal vez la característica fundamental de los robots dedicados a estas tareas sea su método de programación. Obviamente, es preciso que cuenten con un control de trayectoria continua, pues no basta con especificar el punto inicial y final de sus movimientos, sino también la trayectoria. El método normal de programación es el de aprendizaje con un muestreo continuo de la trayectoria. El operario realiza una vez el proceso de pintura con el propio robot, mientras que la unidad de programación registra continuamente, y de manera automática, gran cantidad de puntos para su posterior repetición.

Aplicación de adhesivos y sellantes

Los robots son frecuentemente utilizados para la aplicación de cordones de material sellante o adhesivos en la industria del automóvil sellante de ventanas y parabrisas, material anticorrosión en los bajos del coche, etc.).

En este proceso el material a aplicar se encuentra en forma líquida o pastosa en un tanque, siendo bombeada hasta la pistola de aplicación que porta el robot, que regula el caudal de material que es proyectado.

El robot, siguiendo la trayectoria programada, proyecta la sustancia que se solidifica al contacto con el aire. En este proceso, tan importante como el control preciso de la trayectoria del robot es el control sincronizado de su velocidad y del caudal de material suministrado por la pistola, puesto que la cantidad de material proyectado en un punto de la pieza depende de ambos factores.

Es habitual una disposición del robot suspendido sobre la pieza, siendo necesario, por los motivos antes expuestos, que el robot tenga capacidad de control de trayectoria continua (posición y velocidad reguladas con precisión), así como capacidad de integrar en su propia unidad de control la regulación del caudal de material aportado en concordancia con la velocidad del movimiento.

Alimentación de máquinas

La alimentación de máquinas especializadas es otra tarea de manipulación de posible robotización. La peligrosidad y monotonía de las operaciones de carga y descarga de máquinas como prensas, estampadoras, hornos o la posibilidad de usar un mismo robot para transferir una pieza a través de diferentes máquinas de procesado, ha conseguido que gran número de empresas hayan introducido robots en sus talleres.



En la industria metalúrgica se usan prensas para conformar los metales en frío o, para mediante estampación y embutido, obtener piezas de complicadas formas a partir de planchas de metal. En ocasiones la misma pieza pasa consecutivamente por varias prensas hasta conseguir su forma definitiva. La carga y descarga de estas máquinas se realiza tradicionalmente a mano, con el elevado riesgo que esto conlleva para el operario, al que una pequeña distracción puede costarle un serio accidente. Estas circunstancias, junto con la superior precisión de posicionamiento que puede conseguir

el robot, y la capacidad de éste de controlar automáticamente el funcionamiento de la máquina y dispositivos auxiliares, han hecho que el robot sea una solución ventajosa para estos procesos.

Por otra parte, los robots usados en estas tareas son, por lo general, de baja complejidad, precisión media, número reducido de grados de libertad y de control sencillo, bastando en ocasiones con manipuladores secuenciales. Su campo de acción interesa que sea grande. En cuanto a la carga, varía mucho, pudiéndose necesitar robots con capacidad de carga de pocos kilogramos, hasta de algunos cientos (existen robots capaces de manipular hasta tonelada y media). Las estructuras más frecuentemente utilizadas son la cilíndrica, esférica y articular. También la cartesiana puede aportar en ocasiones la solución más adecuada.

Atención especial merece la aplicación del robot en células flexibles de mecanizado, que han adquirido gran auge en los últimos años. Éstas emplean centros de mecanizado o varias máquinas de control numérico para conseguir complejos y distintos mecanizados sobre una pieza y dar a ésta la forma programada. La capacidad de programación de estas máquinas permite una producción flexible de piezas adaptándose así perfectamente a las necesidades del mercado actual. Estas máquinas emplean diferentes herramientas que se acoplan a un cabezal común de manera automática cuando el proceso de mecanizado lo precisa. Las herramientas a usar en el proceso concreto son almacenadas en tambores automáticos que permiten un rápido intercambio de la herramienta.

El robot es el complemento ideal de estas máquinas. Sus tareas pueden comenzar con la recogida de la pieza del sistema de transporte encargado de evacuarlas o para llevarla a otra máquina. Asimismo, el robot puede ocuparse de cargar el alimentador automático de herramientas de la máquina, reponiendo herramientas gastadas o seleccionando las adecuadas para la producción de una determinada pieza.



En las células de multiproceso el mismo robot alimenta a varias máquinas o centros de mecanizado. Una misma pieza, transportada por el robot, puede ir pasando de una máquina a otra, incluyendo controles metrológicos de calidad u otras tareas de calibración.

La sincronización de toda la célula (alimentadores, centros de mecanizado, robots, etc.) puede ser realizada por la propia unidad de control del robot que cuenta, por lo general, con gran potencia de cálculo y capacidad de manejo de entradas y salidas. En ocasiones estas células cuentan con sistemas multi-robot, que trabajan de manera secuencial con la pieza. Hasta la fecha no existen apenas realizaciones prácticas de cooperación de robots de manera coordinada.

Las características de los robots para estas tareas de alimentación de máquinas herramientas son por lo general similares a las necesarias para la alimentación de otras máquinas. Las únicas discrepancias estriban en su mayor precisión y capacidad de carga inferior (algunas decenas de kilogramos).

Procesado

Dentro del procesado se incluyen operaciones en las que el robot se enfrenta a piezas y herramientas (transportando una u otra) para conseguir, en general, una modificación en la forma de la pieza.

El desbardado consiste en la eliminación de rebabas de la pieza de metal o plástico, procedentes de un proceso anterior (fundición, estampación, etc.). Esta operación se realiza manualmente con una esmeriladora o fresa, dependiendo la herramienta de las características del material a desbardar.



Un robot dedicado al desbardado porta la herramienta o la pieza, según la aplicación, haciendo entrar ambas en contacto. La herramienta debe seguir el contorno de la pieza, que en muchas ocasiones es complejo, con elevada precisión en su posicionamiento y velocidad. Por este motivo se precisan robots con capacidad de control de trayectoria continua y buenas características de precisión y control de velocidad. Además, puesto que las rebabas con que vienen las piezas presentan formas irregulares, conviene que el robot posea capacidad para adaptarse a éstas mediante el empleo de sensores o el desarrollo de un elemento terminal del robot auto adaptable.

Parecida al desbardado, en cuanto a necesidades, es la aplicación de pulido, cambiando básicamente la herramienta a emplear. Las necesidades de precisión y de empleo de sensores son tal vez en este caso menos exigentes.

Corte

El corte de materiales mediante el robot es una aplicación reciente que cuenta con notable interés. La capacidad de reprogramación del robot y su integración en un sistema, hacen que aquél sea el elemento ideal para transportar la herramienta de corte sobre la pieza, realizando con precisión un programa de corte definido previamente desde un sistema de diseño asistido por ordenador (CAD).

Los métodos de corte no mecánico más empleados son oxicorte, plasma, láser y chorro de agua, dependiendo de la naturaleza del material a cortar. En todos ellos el robot transporta la boquilla por la que se emite el material de corte, proyectando éste sobre la pieza al tiempo que sigue una trayectoria determinada.

Las piezas a cortar pueden disponerse en varias capas, unas encima de otras, realizándose el corte simultáneo de todas ellas (método de corte de patrones en la industria textil).



Si bien el oxicotante y el corte por plasma son tecnologías muy extendidas, y consecuentemente bien conocidas, no ocurre lo mismo en el corte por láser y por chorro de agua, de más reciente aparición. La disposición típica del robot en el corte por chorro de agua es el robot suspendido trabajando sobre las piezas fundamentalmente en dirección vertical.

El robot porta una boquilla de pequeño diámetro (normalmente de 0.1mm.) por la que sale un chorro de agua, en ocasiones con alguna sustancia abrasiva, a una velocidad del orden de 900 m/s, y a una presión del orden de 4000 kg/cm². El sistema completo precisa de bomba, intensificador, reguladores de presión y electro válvulas. El corte por chorro de agua puede aplicarse a materiales como alimentos, fibra de vidrio, PVC, mármol, madera, goma espuma, neopreno, yeso, tela, cartón, e incluso a metales como aluminio, acero y titanio. En estos casos se añade al agua una sustancia abrasiva. Las principales ventajas del corte por chorro de agua frente a otros sistemas son:

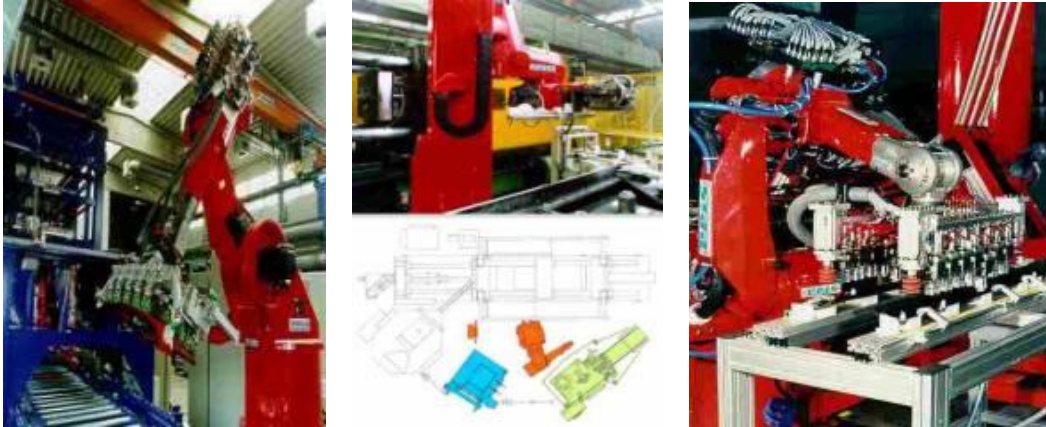
- no provoca aumento de temperatura en el material;
- no es contaminante;
- no provoca cambios de color;
- no altera las propiedades de los materiales;
- el coste de mantenimiento es bajo.

Los robots empleados requieren control de trayectoria continua y elevada precisión. Su campo de acción varía con el tamaño de las piezas a cortar siendo, en general, de envergadura media (de 1 a 3 metros de radio). En este sentido, como se ha comentado, con mucha frecuencia se dispone al robot suspendido boca abajo sobre la pieza.

Montaje

Las operaciones de montaje, por la gran precisión y habilidad que normalmente exigen, presentan grandes dificultades para su automatización flexible. Sin embargo, el hecho de que estas operaciones representen una buena parte de los costes totales del producto, ha propiciado las investigaciones y desarrollos en esta área, consiguiéndose importantes avances.

Muchos procesos de ensamblado se han automatizado empleando máquinas especiales que funcionan con gran precisión y rapidez. Sin embargo, el mercado actual precisa de sistemas muy flexibles, que permitan introducir frecuentes modificaciones en los productos con unos costes mínimos. Por este motivo el robot industrial se ha convertido en muchos casos en la solución ideal para la automatización del ensamblaje.



En particular, el robot resuelve correctamente muchas aplicaciones de ensamblado de piezas pequeñas en conjuntos mecánicos o eléctricos. Para ello el robot precisa de una serie de elementos auxiliares cuyo coste es similar o superior al del propio robot. Entre éstos cabe destacar a los alimentadores (tambores vibradores, por ejemplo), posicionadores y los posibles sensores que usa el robot para ayudarse en su tarea (esfuerzos, visión, tacto, etc.).

Estos sensores son indispensables en muchos casos debido a las estrechas tolerancias con que se trabaja en el ensamblaje y a los inevitables errores, aunque sean muy pequeños, en el posicionamiento de las piezas que entran a formar parte de él. Los robots empleados en el ensamblaje requieren, en cualquier caso, una gran precisión y repetibilidad, no siendo preciso que manejen grandes cargas.



El tipo **SCARA** ha alcanzado gran popularidad en este tipo de tareas por su bajo coste y buenas características. Éstas se consiguen por su adaptabilidad selectiva, presentando facilidad para desviarse, por una fuerza externa, en el plano horizontal y una gran rigidez para hacerlo en el eje vertical.

También se usan con frecuencia robots cartesianos por su elevada precisión y, en general, los robots articulares que pueden resolver muchas de estas aplicaciones con suficiente efectividad.

La dificultad inherente de este tipo de tareas obliga, en casi todos los casos, a facilitarlas con un adecuado rediseño de las partes que componen el conjunto a ensamblar. De este modo, conjuntos cuyo ensamblaje automatizado sería inabordable con su diseño inicial, pueden ser montados de una manera competitiva mediante el empleo de robots.

Paletización

La paletización es un proceso básicamente de manipulación, consistente en disponer piezas sobre una plataforma o bandeja (palet). Las piezas en un palet ocupan normalmente posiciones predeterminadas, procurando asegurar la estabilidad, facilitar su manipulación y optimizar su extensión. Los palets son transportados por diferentes sistemas (cintas transportadoras, carretillas, etc.) llevando su carga de piezas, bien a lo largo del proceso de fabricación, bien hasta el almacén o punto de expedición.



Dependiendo de la aplicación concreta, un palet puede transportar piezas idénticas (para almacenamiento por lotes por ejemplo), conjuntos de piezas diferentes, pero siempre los mismos subconjuntos procedentes de ensamblados) o cargas de piezas diferentes y de composición aleatoria (formación de pedidos en un almacén de distribución).

Existen diferentes tipos de máquinas específicas para realizar operaciones de paletizado. Éstas frente al robot, presentan ventajas en cuanto a velocidad y coste, sin embargo, son rígidas en cuanto a su funcionamiento, siendo incapaces de modificar su tarea de carga y descarga.

Así pues, los robots realizan con ventaja aplicaciones de paletización en las que la forma, número o características generales de los productos a manipular, cambian con relativa frecuencia. En estos casos, un programa de control adecuado permite resolver la operación de carga y descarga, optimizando los movimientos del robot, aprovechando la capacidad del palet o atendiendo a cualquier otro imperativo. Generalmente, las tareas de paletización implican el manejo de grandes cargas, de peso y dimensiones elevadas. Por este motivo, los robots empleados en este tipo de aplicaciones acostumbran a ser robots de gran tamaño, con una capacidad de carga de 10 a 100 kg. No obstante, se pueden encontrar aplicaciones de paletización de pequeñas piezas, en las que un robot con una capacidad de carga de 5 kg. es suficiente.

Las denominadas tareas de *pick and place*, aunque en general con características diferentes al paletizado, guardan estrecha relación con este. La misión de un robot trabajando en un proceso de pick and place consiste en recoger piezas de un lugar y depositarlas en otro. La complejidad de este proceso puede ser muy variable, desde el caso más sencillo en el que el robot recoge y deja las piezas en una posición prefijada, hasta aquellas aplicaciones en las que el robot precisa de sensores externos, como visión artificial o tacto, para determinar la posición de recogida y colocación de las piezas. Al contrario que en las operaciones de paletizado, las tareas de *picking* suelen realizarse con piezas pequeñas (peso inferior a 5Kg) necesitándose velocidad y precisión.

Un ejemplo típico de aplicación de robot al paletizado sería la formación de palets de cajas de productos alimenticios procedentes de una línea de empaquetado. En estos casos, cajas de diferentes productos llegan aleatoriamente al campo de acción del robot. Ahí son identificadas bien por una célula de carga, por alguna de sus dimensiones, o por un código de barras. Conocida la identidad de la caja, el robot procede a recogerla y a colocarla en uno de los diferentes palets que, de manera simultánea, se están formando.

El propio robot gestiona las líneas de alimentación de las cajas y de palets, a la vez que toma las decisiones necesarias para situar la caja en el palet con la posición y orientación adecuadas de una manera flexible.

El robot podrá ir equipado con una serie de ventosas de vacío y su capacidad de carga estaría entorno a los 50kg.

Control de Calidad

La tendencia a conseguir una completa automatización de la producción abarca todas las etapas de ésta, inclusive el control de la calidad. El robot industrial puede participar en esta tarea usando su capacidad de posicionamiento y manipulación. Así, transportando en su extremo un palpador, puede realizar el control dimensional de piezas ya fabricadas. Para ello el robot toca con el palpador varios puntos claves de la pieza.

A partir del conocimiento que en todo instante tiene la unidad de control del robot de la posición y orientación de su extremo, se obtienen los datos relativos a la posición espacial de los puntos determinados de la pieza. Estos datos son utilizados para registrar posibles desviaciones sobre los valores deseados.

Otras posibles aplicaciones del robot en el control de calidad consisten en utilizar a éste para transportar el instrumental de medida (ultrasonidos, rayos X, etc.) a puntos concretos de la pieza a examinar. La situación de posibles defectos detectados puede registrarse y almacenarse a partir, como antes, de la propia unidad de control de robot.

Por último, el robot puede usarse como mero manipulador encargado de clasificar piezas según ciertos criterios de calidad (piezas correctas e incorrectas, por ejemplo). En este caso, el control y decisión de a qué familia pertenece la pieza se hace mediante un sistema específico, capaz de comunicarse con el robot (visión artificial). No existe, en este caso, un tipo concreto de robot más adecuado para estas tareas. En el control dimensional suelen usarse **robots cartesianos** por la precisión de estos pero, en general, son igualmente válidos **robots articulares**.

Manipulación en salas blancas

Ciertos procesos de manipulación deben ser realizados en ambientes extremadamente limpios y controlados. En ellos, la actividad del operador se ve dificultada no por el trabajo en sí, que no tiene por qué ser especialmente complejo o delicado, sino por la necesidad de mantener elevadas medidas de control de impurezas mediante el uso de trajes especiales y controles rigurosos.

Las denominadas salas blancas de la industria de los semiconductores o las de fabricación de algunos productos farmacéuticos, son ejemplos típicos.



La utilización de un robot para estas funciones se realiza introduciendo éste de manera permanente en una cabina. El robot debe cumplir la normativa correspondiente al entorno siendo, por lo demás, válido cualquier robot comercial, normalmente de seis grados de libertad y alcance inferior a un metro. De este modo se consigue, entre otros beneficios, una reducción del riesgo de contaminación, una mayor homogeneidad en la calidad del producto y una reducción en el coste de la fabricación.

❖ **Nuevos sectores de aplicación**

Las aplicaciones de la robótica examinadas anteriormente responden a los sectores que, como el del automóvil o el de la manufactura, han sido desde hace 30 años usuarios habituales de los robots industriales. Este uso extensivo de los robots en los citados se ha visto propiciado por la buena adaptación del robot industrial a las tareas repetitivas en entornos estructurados. De este modo, la competitividad del robot frente a otras soluciones de automatización se justifica por su rápida adaptación a series cortas, sus buenas características de precisión y rapidez, y por su posible reutilización con costes inferiores a los de otros sistemas.

Sin embargo, existen otros sectores donde no es preciso conseguir elevada productividad, en los que las tareas a realizar no son repetitivas, y no existe un conocimiento detallado del entorno. Entre estos sectores podría citarse la industria nuclear, la construcción, la medicina o el uso doméstico. En ninguno de ellos existe la posibilidad de sistematizar y clasificar las posibles aplicaciones, pues éstas responden a soluciones aisladas a problemas concretos. Este tipo de robots ha venido a llamarse robots de servicio y están siendo aplicados en sectores como:

- Agricultura y silvicultura
- Ayuda a discapacitados
- Construcción
- Domésticos
- Entornos peligrosos
- Espacio
- Medicina y salud
- Minería
- Entornos submarinos
- Vigilancia y seguridad
- Telepresencia

En general, la aplicación de la robótica a estos sectores se caracteriza por la falta de estructuración tanto del entorno como de la tarea a realizar, y la menor importancia de criterios de rentabilidad económica frente a la de realizar tareas en entornos peligrosos o en los que no es posible el acceso de las personas. Estas características obligan a que los robots de servicio cuenten con un mayor grado de inteligencia, puesto que se traduce en el empleo de sensores y del *software* adecuado para la toma rápida de decisiones. Puesto que en muchas ocasiones el estado actual de la inteligencia artificial (disciplina que aborda esta problemática) no está lo suficientemente desarrollado como para resolver las situaciones planteadas a los robots de servicio, es frecuente que estos cuenten con un mando remoto, siendo en muchas ocasiones robots teleoperados.

Centros de investigación en robótica, como la universidad de Carnegie-Mellon o el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) en Estados Unidos, han orientado desde hace tiempo buena parte de sus esfuerzos de investigación en robótica en esta línea, desarrollando

robots especializados, capacitados para trabajar en el exterior, en entornos no estructurados y peligrosos (superficie de planetas, volcanes, desastres nucleares, etc.).

13. Ejemplos de algunos robots comerciales

Se resumen a continuación las fichas técnicas de algunos robots comerciales, con el objetivo de dar a conocer las características y los parámetros reales de los robots industriales.

❖ Manipulador Seiko RT 3200

- **Especificaciones:**

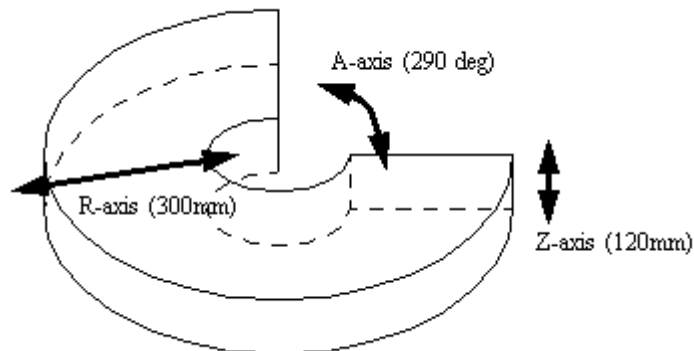
RT 3200	
Grados de libertad	4
Repetibilidad	±0.025 mm (±0.001")
Carga útil (a velocidad máx.)	5 kg (11 lbs., 30 lbs. a velocidades reducidas)
Fuerza vertical de inserción	31 lbs. (14.1 kg)
Momento de inercia de la carga útil (a velocidad máx.)	105 gf·cm·sec ² (103 kg·cm ²)
Neumática	3 líneas
Fuentes de alimentación para sensores o electroválvulas	4
Lenguaje estándar	DARL II Version 4
I/O accesible mediante DARL II	16 / 16 (External) 8 / 8 (Gripper)
Manipulador	Peso: 130 kg
Controlador	Peso: 35 kg
Terminal Teach	Peso: 2.5 kg



	Eje Z vertical	Eje T rotacional	Eje R horizontal	Eje A rotacional	Combinado*
Veloc. máx.	513 mm / sec.	200 deg. / sec.	1000 mm / sec.	420 deg. / sec.	106" / sec.

	(20" / sec.)		(40" / sec.)		
Aceleración	0.52 G's	32 rad / sec. ²	1 G	73 rad / sec. ²	2.5 G's
Resolución	0.0032 mm (0.00013")	0.0013 deg.	0.0063 mm (0.00025")	0.0023 deg.	0.015 mm (0.0006")
Intervalo	120 mm (4.72")	300 deg.	305 mm (12")	±999 deg.	900 mm ³ (3 cubic ft.)
Alimentación	AC200, 220 240V ±10% (unifásico)				
Frecuencia	50 / 60 Hz				
Consumo	2.5 KVA (7.5 KVA en POWER ON)				
Temperatura de operación	0 a 40 ° C				
Humedad de operación	20 a 90% R.H. (sin condensación)				
Atmósfera de operación	Gas no corrosivo				

- Espacio de trabajo**



❖ Manipulador IBM 7535

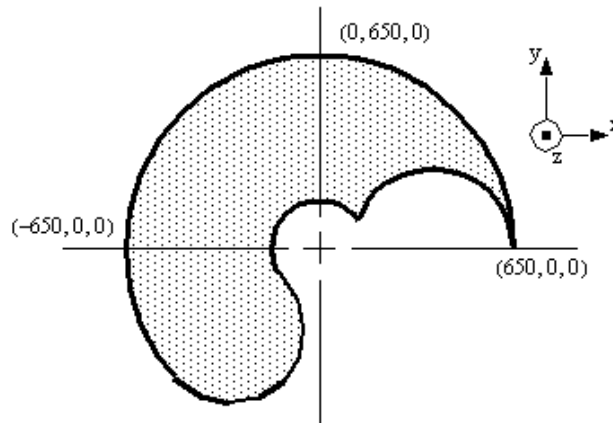
- Especificaciones

IBM SCARA 7535	
Grados de libertad	4
Repetibilidad	±0.05 mm (±0.002")
Carga útil máx.	6 kg (13.2 lbs.)
Neumática	Presión máxima: 6 kg/cm ² (85 psig). Acondicionado mediante separador de humedad, filtro y regulador
Peso	99 kg (218 lb)



	Eje Theta 1 rotacional	Eje Theta 2 rotacional	Eje Roll rotacional	Eje Z prismático
Veloc. baja	vel. máx.: 700 mm/s carga máx.: 6 kg	vel. máx.: 525 mm/s carga máx.: 6 kg	Par manten.: 35 kg-cm (30.4 in.-lb.) carga máx.	Carga útil máx.: 6kg
Veloc. media	vel. máx.: 1100 mm/s carga máx.: 6 kg	vel. máx.: 825 mm/s carga máx.: 6 kg	centrada en eje Z: 6 kg (13.2 lb) Velocidad máx.: 3.7 rad/sec (210 deg./sec. +/-5%)	
Veloc. alta	vel. máx.: 1450 mm/s carga máx.: 1 kg	vel. máx.: 1000 mm/s carga máx.: 1 kg	Par: 14 kg-cm (12.2 in.-lb) Inercia máx. de la carga: 0.1 kg-m ² (0.074 slug-ft ²)	
Resolución	0.00459 deg	0.009 deg.	0.36 deg	n/a
Intervalo	0-200 deg	0-160 deg.	+/- 180 deg	75 mm (2.95 inch)
Temperatura de operación	10 a 40.6 °C			
Humedad de operación	8 a 80% R.H. (sin condensación)			

- Espacio de trabajo**



7535/7540 LINEAR Rate Values Available

Programmed Rate	Arm speed at tool tip mm/sec. (in./sec)	Straight line error mm (in.)
1	60 (2.4)	3.0 (0.12)
2	100 (3.9)	3.7 (0.15)
3	140 (5.5)	4.4 (0.17)
4	180 (7.1)	5.3 (0.21)
5	225 (8.9)	6.2 (0.24)
6	265 (10.4)	6.9 (0.27)
7	305 (12.0)	7.6 (0.30)
8	345 (13.6)	8.4 (0.33)
9	385 (15.2)	9.3 (0.37)
10	430 (16.9)	10.0 (0.39)
20	430 (16.9)	11.5 (0.45)
30	430 (16.9)	11.5 (0.45)
50	430 (16.9)	11.5 (0.45)
0	Exit linear speed and motion	

7535 Program Speed Values for PAYLOAD Command

Program speed values	Speed of theta1 at the tool tip mm/sec (in./sec)	Speed of theta2 at the tool tip mm/sec (in./sec)	Maximum payload for speed kg (lb)
1	300 (11.8)	225 (8.9)	6 (13.2)
2	500 (19.7)	375 (14.8)	6 (13.2)
3	700 (27.6)	525 (20.7)	6 (13.2)
4	750 (29.5)	575 (22.6)	6 (13.2)
5	900 (35.4)	675 (26.6)	6 (13.2)
6	1000 (39.3)	750 (29.5)	6 (13.2)
7	1100 (43.3)	825 (32.4)	6 (13.2)
8	1200 (47.2)	900 (35.4)	3.5 (7.7)
9	1300 (51.2)	950 (37.4)	2 (4.4)
10	1450 (57.1)	1000 (39.3)	1 (2.2)
0	Default to speed switches		

NOTE: Speeds in the table are for planning purposes only and are typical minimum values. Speed values only consider a single joint moving. Speed at the end of the arm is greater when multiple joints are used on a single move.

❖ ABB IRB-1000

- **Especificaciones:**

ASEA IRB-1000	
Grados de libertad	5
Precisión en la muñeca	+/- 0.20 mm
Carga útil máx.	6 kg (para una herramienta de 200 mm de <i>offset</i>)
Momento de inercia máx.	dinámico: 2.5 N m estático: 12 N m
Peso	125 kg (218 lb)




ABB Robots - Your best performers

	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
Tipo de junta	revolución	revolución	revolución	revolución	revolución
Intervalo	340 deg	+/- 40 deg.	25 - (-40) deg	+/- 90 deg	+/- 180 deg
Velocidad	95 deg/s	0.75 m/s	1.1 m/s	115 deg/s	195 deg/s
Actuador	servo	servo	servo	servo	servo
Pinza	<p>Neumática: 2 electroválvulas se localizan en el brazo superior; pueden ser operadas por programa</p> <p>Eléctrica: existe una conexión de cuatro polos en el brazo superior para el uso de pinzas avanzadas con funciones de búsqueda.</p>				