
CAPÍTULO 10

Aplicaciones de los robots

Si no se pisa el barro, no se hace el jarro.
Refranero popular

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 en día el robot es, sin duda alguna, la solución más rentable [ENGELBERGER-80], [GROOVER-89] [APPLETON-87].

En la década de los ochenta, empezaron a desarrollarse robots destinados a trabajar en aplicaciones no industriales. A diferencia de aquéllas, en las que el robot justificaba su presencia, fundamentalmente por su elevada capacidad productiva, en estas nuevas aplicaciones el robot aportaba el eximir al humano de tareas peligrosas o el ampliar sus capacidades de fuerza o precisión. La utilización de estos robots, que se han venido a denominar genéricamente «robots de servicio», no se realiza a gran escala, esto es, no trabajan en largas líneas de producción, sino en aplicaciones singulares como ambientes contaminados, salas asépticas, construcción, quirófano, etc. [ENGELBERGER-89] y [SCHRAFT-02]. En la actualidad, la robótica ha abordado un nuevo mercado: el doméstico. Éste posee unas características comerciales particulares (precios reducidos, gran número de usuarios potenciales) y unas necesidades tecnológicas singulares (interfases sencillas aptas para usuarios no especializados, ergonomía, seguridad, etc.). Sus aplicaciones van desde el entretenimiento o la atención personal (mascotas, asistentes para personas con dificultades de movilidad) hasta la realización de labores domésticas (aspirador, cortacésped, etc.). Los robots domésticos se consideran aún como una variante de los robots de servicio, pero sus particularidades y el gran volumen actual e incremento potencial de unidades que está previsto sean instaladas, puede dar lugar a que en un futuro cercano tengan su propia identidad.

En este capítulo se repasan las aplicaciones industriales más frecuentes, destacando las posibilidades del robot y sus ventajas frente a otras alternativas. Asimismo, se revisan las aplicaciones de robots de servicio tratando de mostrar, con una perspectiva abierta, cuáles son los cometidos que pueden ser encomendados a un robot.

10.1. APLICACIONES DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES MANIPULADORES. CLASIFICACIÓN

La *Federación Internacional de la Robótica* (IFR), con el apoyo de sus miembros nacionales (en España éste es la Asociación Española de Robótica y Automatización Tecnologías de Producción) realiza y publica anualmente en colaboración con la *Economic Comision for Europe* de las Naciones Unidas, un estudio sobre el estado mundial de la robótica ([IFR-04] y [IFR-05]). En éste las aplicaciones de los robots industriales manipuladores se clasifican de acuerdo a las áreas recogida en Tabla 10.1. Esta clasificación pretende englobar la mayor parte de los procesos robotizados en la actualidad aunque se pueden encontrar aplicaciones particulares que no aparecen de manera explícita en esta clasificación, como demuestran las revisiones periódicas de la estructura de la clasificación que la IFR realiza. En el siguiente epígrafe se tratan con detalle todas estas aplicaciones.

Tabla 10.1. *Clasificación de las aplicaciones de los robots industrial manipuladores, según IFR [IFR-04]*

000	Sin especificar
110	Manipulación en fundición
111	Moldes
119	Otros
130	Manipulación en moldeo de plásticos
140	Manipulación en tratamientos térmicos
150	Manipulación en la forja y estampación
160	Soldadura
161	Al arco
162	Por puntos
163	Por gas
164	Por láser
169	Otros
170	Aplicación de materiales
171	Pintura
172	Adhesivos y secantes
179	Otros
180	Mecanización
181	Carga y descarga de máquinas
182	Corte mecánico, rectificado, desbarbado y pulido
189	Otros
190	Otros procesos
191	Corte por Láser
192	Corte por chorro de agua
199	Otros
200	Montaje
201	Montaje mecánico
202	Inserción
203	Unión por adhesivos
204	Unión por soldadura
205	Manipulación para montaje
209	Otros
210	Paletización y empaquetado
220	Medición, inspección, control de calidad
230	Manipulación de materiales
240	Formación, enseñanza e investigación
900	Otros

10.2. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS ROBOTS

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 introducción del robot.

En cuanto al tipo de robot a utilizar, habrá que considerar aspectos de diversa índole como área de acción, velocidad de carga, capacidad de control, coste, etc. Éstos ya fueron examinados con detalle en el Capítulo 9.

En la actualidad ciertas aplicaciones industriales cuentan con suficiente experiencia en su robotización como para poder fijar unos criterios generales en cuanto a las posibilidades reales del uso del robot en ellas, así como en cuanto a las dificultades, cambios y ventajas a las que la introducción del robot puede dar lugar. El tiempo transcurrido desde la primera robotización de un proceso industrial, la manipulación de piezas procedentes de fundición por inyección (instalado en la fábrica de la *General Motors* de Trenton en 1961), es más que suficiente como para haber podido valorar con detalle las ventajas e inconvenientes del robot.

A continuación, van a ser analizadas algunas de las aplicaciones industriales de los robots manipuladores, dando una breve descripción del proceso, exponiendo el modo en el que el robot entra a formar parte de él, y considerando las ventajas e inconvenientes. Por último, en algunos casos, se presentará y comentará alguna aplicación práctica real.

10.2.1. Trabajos en fundición

La fundición por inyección fue el primer proceso robotizado (1961). 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 pasando a continuación a un proceso de eliminación de rebabas procedentes del metal que ha rebosado el molde y los bebederos (desbarbado). El molde, una vez limpio de residuos de restos de metal y adecuadamente lubricado, puede ser usado de nuevo.

En la fundición por inyección el robot puede realizar numerosas tareas auxiliares (Figura 10.1) como son:

- Extracción de las piezas del molde y transporte de éstas a un lugar de enfriado y posteriormente a otro proceso (desbarbado, corte, etc.).
- Limpieza y mantenimiento de los moldes eliminando residuos (por aplicación de aire comprimido u otro elemento) y aplicando el lubricante que facilite el desmoldeo.
- Colocación de piezas en el interior de los moldes (embutidos).

Las cargas manejadas por los robots en estas tareas suelen ser medias o altas (entre decenas y centenas de kilogramos), no necesitan una gran precisión (salvo tal vez si deben colocar piezas en el interior del molde) y su campo de acción ha de ser grande. Su estructura más frecuente es la polar y la articular. Su sistema de control no requiere prestaciones especiales. El robot suele situarse bien en el centro de una célula, atendiendo a diversas máquinas (prensa de moldeado, prensa de desbarbado, baño de enfriamiento, etc.), o bien suspendido sobre la prensa, facilitando el acceso a su interior para las tareas de desmoldeo y limpieza-lubricación.

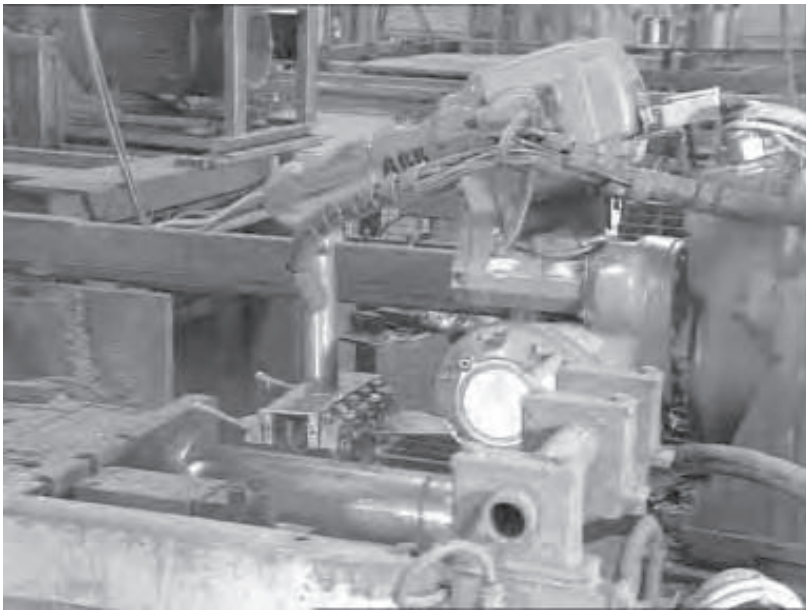


Figura 10.1. Robot trabajando en molde por inyección. (Cortesía ABB).

Otro proceso de fundición robotizado es el denominado fundición a la cera perdida, por microfundición o a la cáscara. Este sistema permite fundir piezas con una gran precisión y buen acabado superficial.

En este proceso, el robot puede realizar las tareas relativas a la fabricación del molde de material refractario a partir del modelo de cera, por sucesivas inmersiones controladas del mismo en baños de arenas refractarias. El robot, dotado de una pinza especial, recoge un racimo de modelos (conjunto de varios modelos unidos) y lo introduce en una masa de grano fino, intercalando extracciones y centrifugaciones para conseguir un reparto uniforme del recubrimiento. Varios robots en serie pueden ir introduciendo, secuencialmente, los racimos en diferentes tipos de arenas y, por último, en un horno, pudiéndose conseguir un proceso continuo de fabricación de moldes (Figura 10.2).

Por lo general, los robots de fundición deben estar preparados para trabajar en un ambiente sucio y hostil, con temperaturas superiores a los 1.000 °C. Sus capacidades de carga varían entre los 10 kg y los 250 kg.

10.2.2. Soldadura

La industria automovilística ha sido la gran impulsora de la robótica industrial, empleando la mayor parte de los robots hoy en día instalados. La tarea más frecuentemente robotizada 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 por la fusión conjunta de ambas partes, denominándose a este tipo de soldadura «por puntos».

Para ello, se hace pasar una corriente eléctrica de elevada intensidad (1.500 A) y baja tensión a través de dos electrodos enfrentados entre los que se sitúan las piezas a unir. Los electrodos instalados en una pinza de soldadura, deben sujetar las piezas con una presión deter-

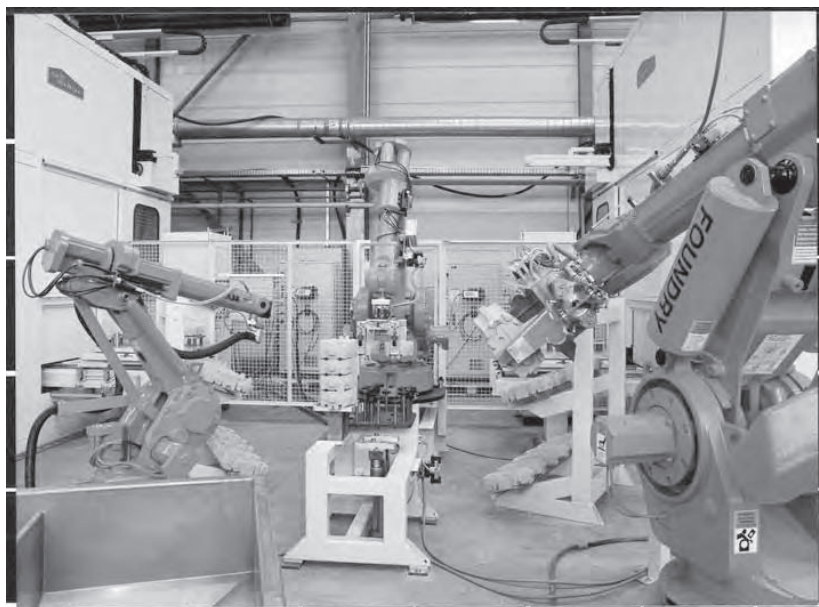


Figura 10.2. Grupo de robots trabajando en fundición a la cera. (Cortesía ABB).

minada (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 el 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. Una vez situada una carrocería en el pasillo, los robots, de manera coordinada, posicionan las pinzas de soldadura realizando varios puntos consecutivamente (Figura 10.3)

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. Asimismo, la conveniencia de situar el transformador que alimenta a los electrodos cerca de éstos para minimizar las pérdidas originadas por la circulación de intensidades elevadas a lo largo de grandes longitudes de cables y las desventajas que supone situar un elemento pesado, como es el transformador, en el extremo del robot (junto a los electrodos) hace conveniente que las características particulares de los robots de soldadura por puntos sean consideradas en el diseño mecánico y en el control del robot, resultando que con frecuencia los fabricantes proporcionan una gama específica de robots para la soldadura por puntos.

Los robots de soldadura por puntos precisan capacidad de carga del orden de los 50-100 kilogramos y estructura articular, con suficientes grados de libertad (5 o 6) como para posicionar y orientar la soldadura (o pieza, según el caso) en lugares de difícil acceso. En cuanto al control y dado que los puntos de soldadura sólo se dan una vez que el robot ha llegado a su destino, es suficiente con que dispongan de control punto a punto. No obstante, y dado que el

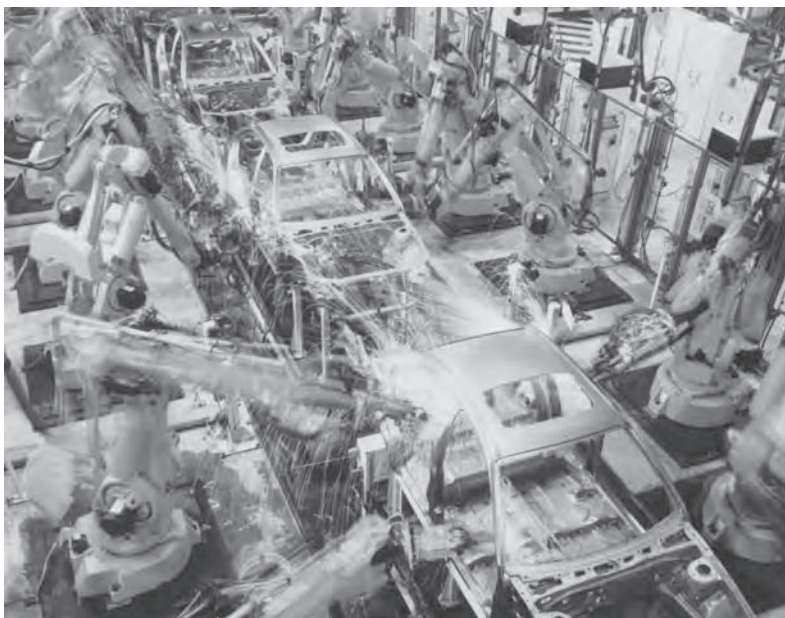


Figura 10.3. Línea de soldadura por puntos robotizada. (Cortesía ABB).

acceso a los puntos de soldadura se realiza a través de entornos complejos (interior de la carrocería del vehículo), el control continuo de la trayectoria es en ocasiones cuanto menos aconsejable.

El otro tipo de soldadura, también ampliamente robotizado aunque en menor grado que el anterior, es el de soldadura por arco. En ella se unen dos piezas mediante la aportación de un flujo de material fundido procedente de una varilla de metal (electrodo). Un arco eléctrico, entre la pieza a soldar y el electrodo, origina las altas temperaturas que funden este último. La calidad de la soldadura depende de la distancia entre pieza y electrodo, de la velocidad de desplazamiento del electrodo por la trayectoria de soldadura, de la tensión e intensidad empleadas, del ángulo de ataque del electrodo, etc. Las altas temperaturas facilitan la oxidación del metal y su consecuente deterioro. Para solventarlo, se proyecta, sobre la zona sometida a la soldadura, un gas inerte o un gas no activo que, generando una campana que la aísla del oxígeno del aire, contribuye a mejorar el resultado del proceso.

La dificultad de mantener constantes las variables antes citadas, junto con el ambiente peligroso en el que se desarrolla la soldadura por arco (radiación ultravioleta, humo, chispas, etc.) propician que el robot sustituya al humano en este proceso.

Los robots de soldadura por arco cuentan con una pistola que aporta el alambre del electrodo (véase Figura 10.4). Para realizar cordones de soldadura siguiendo caminos complicados, precisan un control de trayectoria continua. No necesitan gran capacidad de carga (10 kg), pero sí es conveniente un amplio campo de acción (alrededor de 2 m de radio) y un número elevado de grados de libertad (5 o 6), incorporando incluso el control de ejes externos que mueven el utillaje que soporta a la pieza. Algunos fabricantes han dotado a las unidades de control de sus robots de instrucciones especiales para efectuar la soldadura por arco, pudiéndose especificar los parámetros de soldadura. En ocasiones, y para aumentar la accesibilidad del robot, se dispone éste suspendido sobre las piezas a soldar. Esto permite cubrir grandes superficies posicionando y orientando la pistola a lo largo de complicadas trayectorias.

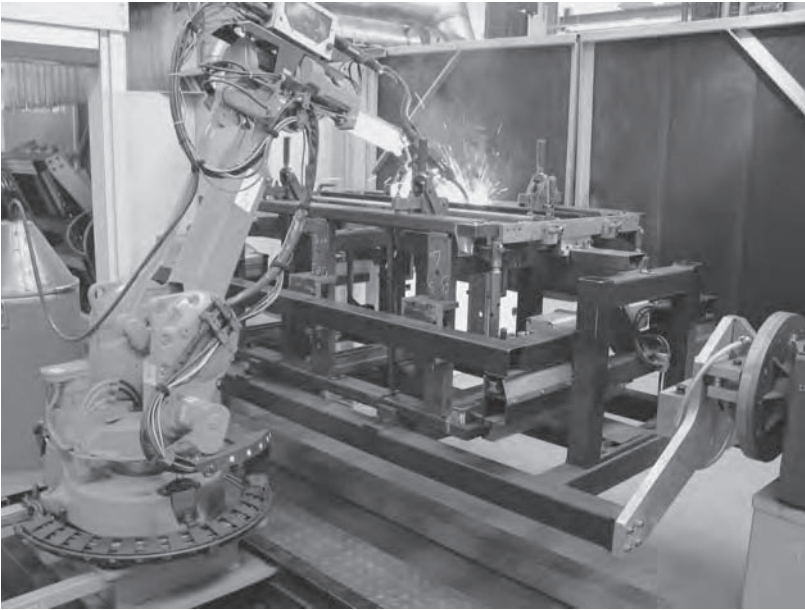


Figura 10.4. Célula robotizada de soldadura al arco. (Cortesía ABB).

Con el mismo objetivo de facilitar el acceso del robot a la zona a soldar, las piezas son fijadas en ocasiones a soportes con capacidad de movimiento (mesas orbitales) que orientan la pieza en la posición más adecuada en base a las órdenes recibidas desde la misma unidad de



Figura 10.5. Programación de robot de soldadura al arco dotado de una mesa orbital. (Cortesía ABB).

control del robot. Los movimientos de estas mesas son controlados como grados de libertad externos del robot, de modo que son especificados en las mismas instrucciones de movimiento del robot (Figura 10.5).

Asimismo, la posible imprecisión en el posicionamiento de las piezas a unir dificulta el posicionado inicial y seguimiento del cordón. Por ello, algunos robots incluyen sensores especiales para localizar el comienzo y seguir el cordón de manera automática.

Estos sistemas de seguimiento del cordón están basados normalmente en sensores láser. Éste es capaz de detectar inicialmente la posición de comienzo del cordón así como de determinar su anchura para, posteriormente, seguir el cordón. Se consiguen así precisiones del orden de 0,5 mm a velocidades de 40 mm/s.

10.2.3. Aplicación de materiales. Pintura

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 o esmaltado, 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 (pintura) 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 pieza y pistola, velocidad de movimiento de ésta, número de pasadas, etc. Todos estos parámetros son tradicionalmente controlados visualmente 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, un riesgo de incendio, etc. 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. El método de programación preferido es el de aprendizaje o guiado. 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, deterioros mecánicos, etc.) (véase Figura 10.6).

Este mismo motivo ha originado que, hasta hace algunos años, los accionamientos de los robots de pintura fuesen hidráulicos, evitando los riesgos de explosión debidos a las commutaciones de las escobillas de los motores de corriente continua. Las ventajas generales de los accionamientos eléctricos frente a los hidráulicos, ha dado lugar a que actualmente la gran mayoría de los robots recurran a accionamientos eléctricos, disminuyendo el riesgo de explosión con el uso de motores sin escobillas o introduciendo el cableado por el interior de conductos a sobrepresión, que impiden el contacto de éstos con las partículas de pintura en suspensión.



Figura 10.6. Robot de Pintura. (Cortesía ABB).

10.2.4. 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.) (Figura 10.7).



Figura 10.7. Aplicación de sellante en el interior de un automovil mediante Robot. (Cortesía ABB).

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 preprogramada, 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. Por estos motivos es preciso que el robot tenga capacidad de control de trayectoria continua (posición y velocidad regulados 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.

La disposición de robot suspendido sobre la pieza aporta las ventajas derivadas de un mejor aprovechamiento del campo de acción.

10.2.5. 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 procesamiento, 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 de estampación 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 (Figura 10.8).

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 un control sencillo (PTP), 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 cilíndrica, esférica y articular se prestan bien a este tipo de tareas, pero la flexibilidad de aplicaciones de la estructura articular y la oferta de mercado de robots, hace que sea esta última la configuración predominante. En ocasiones es ventajoso el uso de un grado de libertad adicional que permita el desplazamiento longitudinal del robot.

Atención especial merece la aplicación del robot en las células flexibles de mecanizado. Éstas emplean centros de mecanizado o varias máquinas de control numérico (CN) para conseguir complejos y distintos mecanizados sobre las piezas. En los centros de mecanizado se realiza sobre una pieza los diferentes procesos de mecanización para 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 (pequeñas y variadas series, etc.).

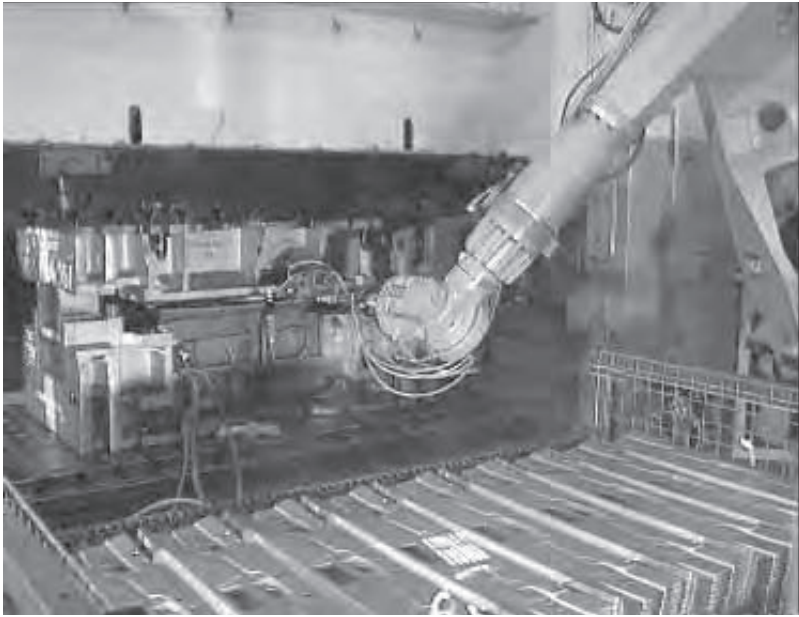


Figura 10.8. Robot alimentando de prensa de estampación. (Cortesía Kuka).

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 un 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 y su carga en la máquina de mecanizado. Cuando ésta finaliza su programa, el robot retira la pieza para dejarla en el sistema de transporte encargado de evacuarlas o para llevarla a otra máquina (o a la misma tras un cambio de orientación). 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 (Figura 10.9).

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.

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 (decenas de kilogramos a lo sumo).

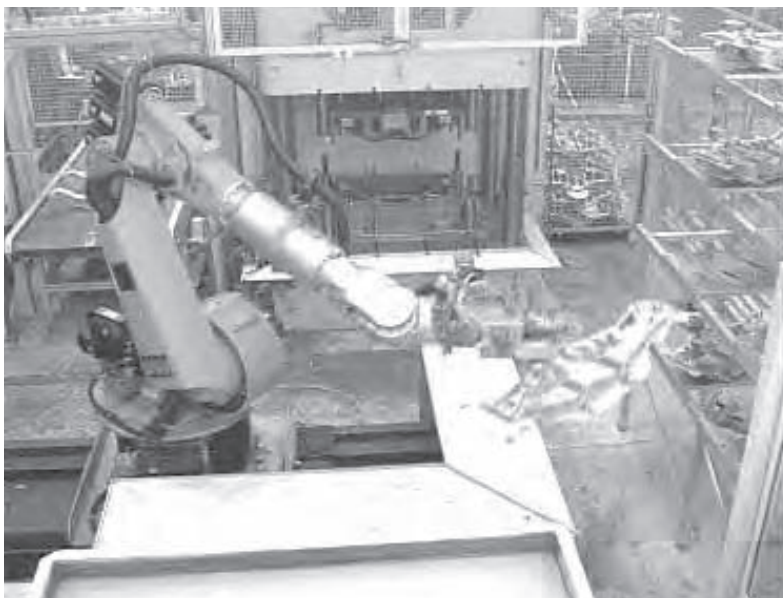


Figura 10.9. Manutención de célula de fundición por inyección. (Cortesía Kuka).

10.2.6. Procesado

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

El desbarbado consiste en la eliminación de rebabas de las piezas 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 desbarbar. Un robot dedicado al desbarbado porta la herramienta o la pieza, según la aplicación, haciendo entrar en contacto ambas. 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 autoadaptable.

Parecida al desbarbado 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 (Figura 10.10).

10.2.7. Corte

El corte de materiales mediante robot es una aplicación reciente que cuenta con notable interés. La capacidad de reprogramación del robot y su integración en un sistema CIM, 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 Computador (CAD).



Figura 10.10. Pulido de implantes de cadera. (Cortesía Kuka).

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 (Figura 10.11).

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



Figura 10.11. Estación de corte por plasma robotizada. (Cortesía Kuka).

Si bien el oxicorte y el corte por plasma son tecnologías muy extendidas y consecuentemente bien conocidas, no ocurre lo mismo con 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 la de robot suspendido trabajando sobre las piezas fundamentalmente en dirección vertical.

El robot porta una boquilla de pequeño diámetro (normalmente de 0,1 mm) 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 4.000 kg/cm². El sistema completo precisa de bomba, intensificador, reguladores de presión y electroválvulas [DRAUGHTON-93].

El corte por chorro de agua puede aplicarse a materiales como alimentos, fibra de vidrio, PVC, mármol, madera, gomaespuma, 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 un aumento de temperatura en el material.
- No es contaminante.
- No provoca cambios de color.
- No altera las propiedades de los materiales.
- Coste de mantenimiento bajo.

Los robots empleados precisan 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 (Figura 10.12).

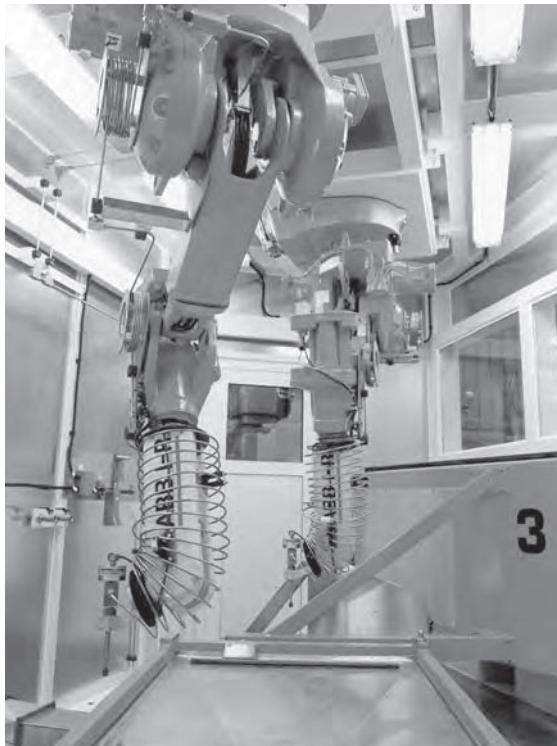


Figura 10.12. Corte por chorro de agua robotizado. (Cortesía ABB).

10.2.8. 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 este 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 adecuada para la automatización del ensamblaje.

En particular, el robot resuelve correctamente muchas aplicaciones de ensamblado de piezas pequeñas en conjuntos mecánicos o eléctricos (Figura 10.13). Para ello, el robot precisa toda una serie de elementos auxiliares o periféricos cuyo coste es similar o superior al del propio robot. Entre éstos cabe destacar los alimentadores (tambores vibradores, por ejemplo), posicionadores y los posibles sensores que usa el robot para ayudarse en su tarea (esfuerzos, visión, tacto, etc.).

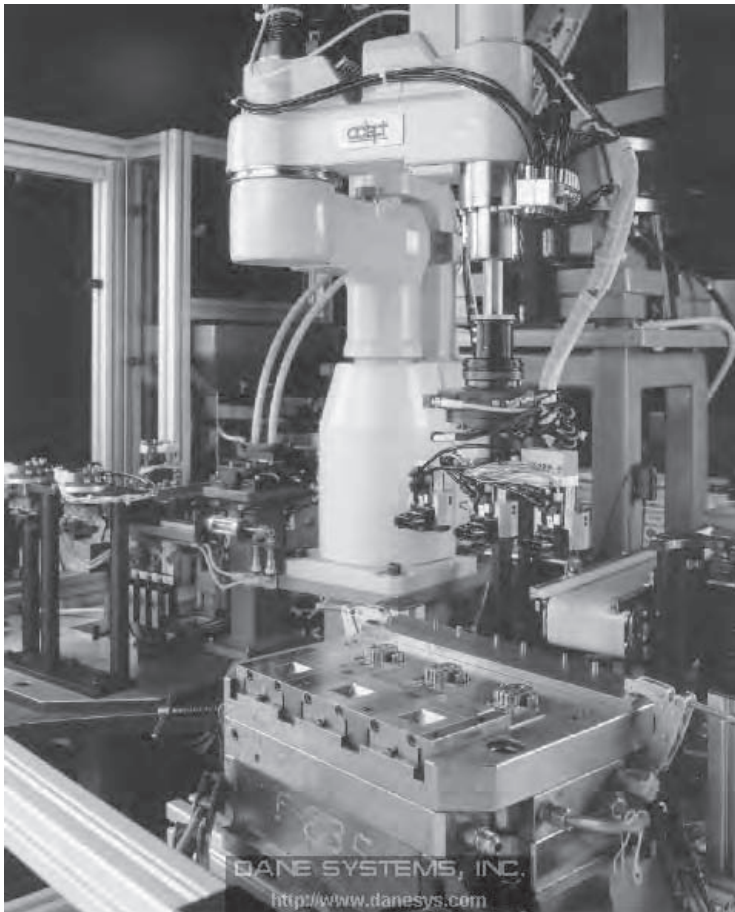


Figura 10.13. Célula de ensamblado con Robot Adept. (Cortesía Dane Systems, Inc.).

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 tomar parte en él.

Los robots empleados en el ensamblaje requieren, en cualquier caso, una gran precisión y repetitividad, 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 son adecuados los 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 a 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.

10.2.9. Paletización y empaquetado

La paletización es un proceso básicamente de manipulación, consistente en disponer piezas sobre una plataforma o bandeja (*pallet*). Las piezas en un *pallet* ocupan normalmente posiciones predeterminadas, procurando asegurar la estabilidad, facilitar su manipulación y optimizar su extensión. Los *pallets* son transportados por diferentes sistemas (cintas transportadoras, carretillas, AGV, 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 *pallet* 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, pueden presentar ventajas en cuanto a velocidad y coste, sin embargo, son rígidas en cuanto a su funcionamiento, siendo costoso o imposible 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 (Figura 10.14). En estos casos, un programa de control adecuado permite resolver la operación de carga o descarga, optimizando los movimientos del robot, aprovechando al máximo la capacidad del *pallet* 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.

Dado que el paletizado se realiza en un espacio de la tarea de 4 grados de libertad (X, Y, Z, q) en el que los productos son recogidos y depositados siempre en la dirección vertical, cabe asumir que para el paletizado sea suficiente con utilizar robots de 4 gdl. Los robots con configuración cartesiana y Scara son por ello una alternativa directa para el paletizado que, sin embargo, se ve superada en el mercado por el uso de robots articulares. En este sentido, varios fabricantes de robots han desarrollado robots articulares de 4 gdl específicos para el paletizado, en los que se garantiza que la carga adopta siempre la dirección vertical.



Figura 10.14. Paletizado mediante Robot. (Cortesía ABB).

Un ejemplo típico de aplicación del robot al paletizado sería la formación de *pallets* de cajas de productos alimenticios procedentes de la línea de empaquetado. En estos casos, cajas de diferentes productos llegan aleatoriamente al campo de acción del robot. Allí, 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 *pallet* que, de manera simultánea, se están formando. El propio robot gestiona las líneas de alimentación de cajas y de *pallet*, a la vez que toma las decisiones necesarias para situar la caja en el *pallet* con la posición y orientación adecuadas de una manera flexible. El robot podría ir equipado con una serie de ventosas de vacío y su capacidad de carga estaría en torno a los 50 kg.

Las denominadas tareas de empaquetado, enmarcadas dentro de las denominadas de *pick & place* (coger y colocar), tienen características diferentes al paletizado, pero guardan cierta relación con éste (Figura 10.15).

La misión de un robot trabajando en un proceso de *pick & 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 precise 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 los 5 kg) necesitándose velocidad y precisión.



Figura 10.15. Empaquetado de copas de cristal mediante Robot. (Cortesía Stäubli).

10.2.10. Control de Calidad

La tendencia a conseguir una completa automatización de la producción abarca todas las etapas de ésta, inclusive el control de 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.

El robot puede usarse también como manipulador encargado de clasificar piezas según ciertos criterios de calidad (piezas correctas e incorrectas, por ejemplo). En este caso, el con-



Figura 10.16. Robot OCCUBOT VI ensayando asiento de automóvil. (Cortesía Kuka).

trol y decisión de a qué familia pertenece la pieza se hace mediante un sistema específico, capaz de comunicarse con el robot (visión artificial, sistema de pesaje, etc.).

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 éstos pero, en general, son igualmente válidos robots articulares.

Una posible contribución adicional del robot dentro del control de calidad puede encontrarse en los ensayos de fatiga de productos. Por ejemplo, es frecuente que, de acuerdo a un adecuado muestreo, algunos de los elementos producidos se sometan a ensayos en los que se trata de evaluar la vida del producto, simulando para ello el uso del mismo un elevado número de veces. En este tipo de ensayos se englobaría, por ejemplo, la apertura y cierre de la puerta de un electrodoméstico, la maniobra de un grifo monomando o la flexión de la suela de un calzado. Estas maniobras se pueden automatizar mediante mecanismos desarrollados a medida y controlados por un equipo como un PLC o un sistema informático simple. Sin embargo, si las modificaciones en el tipo de maniobra a realizar son frecuentes, o si las trayectorias espaciales a realizar son complejas, el uso de un robot puede ser ventajoso, por cuanto no precisa del diseño y fabricación del automatismo electromecánico y puede realizar maniobras que impliquen movimientos espaciales complicados (Figura 10.16).

10.2.11. Manipulación en salas limpias o blancas

Ciertos procesos de manipulación deben ser realizados en ambientes extremadamente limpios o controlados. En ellos, la actividad del operador se ve dificultada no por el trabajo en sí, que no tiene porqué 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 salas de fabricación de algunos productos farmacéuticos, son ejemplos típicos (Figura 10.17).

Diversos procesos de la industria farmacéutica, como la producción de vacunas y hormonas, o la preparación de injertos de piel y reproducción de células, deben ser realizados bajo estrictas condiciones de esterilidad. La manipulación de estos productos durante su fabricación se realiza en cabinas con protección de clase 10, en las que los operadores deben pasar por un minucioso proceso de esterilización antes de entrar al interior.

Las funciones típicas de manipulación a realizar en estos procesos son la recogida de una de las probetas que contienen el producto en fase de fabricación, su apertura, la adición de algún nuevo producto, giro de la probeta, etc.

La utilización de un robot para estas funciones se realiza introduciendo éste de manera permanente en la cabina. El robot debe cumplir la normativa correspondiente al entorno de clase 10, 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.

Con menos exigencias de limpieza que las demandadas en la fabricación de semiconductores o en la industria farmacéutica, la industria alimenticia puede hacer uso de robots para la preparación o procesado de alimentos. En las salas de despiece de carne, se debe trabajar a temperaturas bajas, con un grado de limpieza adecuado. Los cortes a realizar deben comenzar en un punto definido y seguir una trayectoria especificada por la disposición de determinados huesos o músculos. El robot puede llevar la herramienta de corte (sierra o chorro de agua) y realizar la tarea del despiece. Puesto que en este caso los elementos a manipular no

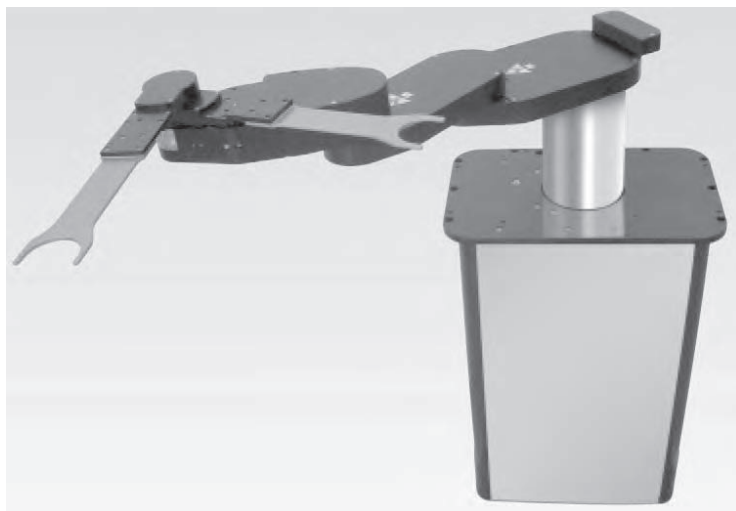


Figura 10.17. Robot para sala blanca. (Cortesía Kawasaki).



Figura 10.18. Robot en sala de despiece de porcino. (Cortesía Kuka).

son completamente iguales, se precisa de un uso intensivo de sensores auxiliares (visión y fuerza) para guiar al robot en sus tareas (Figura 10.18).

Otra aplicación cuya robotización es frecuente, es la preparación de bandejas de comida o el empaquetado de productos en bandejas para su comercialización. En este caso, se trata de tareas de coger y colocar (*«pick & place»*) que deben ser realizadas sobre un volumen elevado



Figura 10.19. Robot de estructura paralela manipulando alimentos. (Cortesía ABB).

de productos a gran velocidad. Robots de tipo Scara o con estructura paralela, auxiliados de sistemas de visión, están siendo aplicados exitosamente en este tipo de tareas.

10.3. APLICACIONES DE LOS ROBOTS DE SERVICIO. CLASIFICACIÓN

Las aplicaciones de la robótica examinadas anteriormente responden a los sectores que, como el del automóvil o de la manufactura, han sido desde los años setenta usuarios habituales de los robots industriales. Este uso extensivo de los robots en los citados sectores 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.

De acuerdo a la definición dada por la Federación Internacional de Robótica (IFR) un **robot de servicio** es «*aquel que opera de manera parcial o totalmente autónoma, desarrollando servicios útiles para el bienestar de los humanos y equipos, excluyendo las aplicaciones de manufactura*».

Esta definición es sin duda generalista, lo que viene motivado por la gran variedad de tareas que realizan en la actualidad los robots de servicio. Así, la definición contempla que los robots de servicio puedan incorporar o no capacidades de manipulación o de movilidad.

La misma IFR ha establecido la siguiente extensa clasificación de las aplicaciones que pueden ser realizadas por los robots de servicio [IFR-04] (Tabla 10.2):

Tabla 10.2. Clasificación de las aplicaciones de los robots de servicio, según IFR

Sección I	ROBOTS PERSONALES Y DOMÉSTICOS
1-5	Robots para tareas doméstica <ul style="list-style-type: none"> 1 Aspiradores 2 Cortacésped 3 Limpieza de fondos de piscinas 4 Limpieza de ventanas 5 Otros
6-10	Robots de entretenimiento <ul style="list-style-type: none"> 6 Juguetes robotizados 7 Entretenimiento 8 Ocio 9 Educación y entrenamiento 10 Otros
11-14	Asistenciales, ayuda a discapacitados <ul style="list-style-type: none"> 11 Sillas de ruedas robotizadas 12 Otras funciones asistenciales 13 Rehabilitación
15	Transporte Personal
16	Seguridad y vigilancia de la vivienda
17	Otros usos personales y domésticos

Tabla 10.2. Clasificación de las aplicaciones de los robots de servicio, según IFR (Continuación)

Sección II	ROBOTS DE SERVICIOS PROFESIONALES
18-23	Robots de exteriores 18 Agricultura 19 Ordeñadoras robotizadas 20 Trabajos en bosque y silvicultura 21 Minería 22 Espacio 23 Otros
24-28	Limpieza profesional 24 Limpieza de suelos 25 Limpieza de ventanas y paredes 26 Limpieza de tanques, tubos y tuberías 27 Limpieza de depósitos 28 Otras tareas de limpieza
29-31	Sistemas de inspección 29 Robots para alcantarillas 30 Inspección de tanques, tubos y tuberías 31 Otros sistemas de inspección
32-36	Construcción y demolición 32 Sistemas de demolición- desmantelamiento y demolición de sistemas con contaminación nuclear 33 Otros sistemas de demolición 34 Robots de soporte a la construcción y mantenimiento 35 Construcción 36 Otros tipos de construcción
37-40	Sistemas logísticos 37 Mensajería 38 Correo 39 Logística en fábrica 40 Otras actividades logísticas
41-44	Medicina 41 Sistemas de diagnóstico 42 Terapia o Cirugía asistida con robot 43 Sistemas de rehabilitación 44 Otras aplicaciones en medicina
45-50	Defensa, rescate y seguridad 45 Desactivadores de minas 46 Lucha contra fuego y explosivos 47 Vigilancia y seguridad 48 Vehículos aéreos no tripulados (UAV). Sistemas de vigilancia 49 Armamento 50 Otros
51	Submarinos
52	Plataformas móviles de uso general
53-55	Robots de laboratorio 53 Manipulación de materiales en general 54 Robots de sala blanca 55 Otros
56-59	Relaciones públicas 56 Hoteles y restaurantes 57 Robots guía o cicerone 58 Marketing 59 Otros (por ejemplo, servicio en bibliotecas)

Tabla 10.2. Clasificación de las aplicaciones de los robots de servicio, según IFR (Continuación)

Sección II ROBOTS DE SERVICIOS PROFESIONALES (Continuación)	
60-61	Propósito especial
60	Atención en gasolineras o estaciones de servicio (recarga de combustible)
61	Otros
62	Humanoides
63	Robots a medida
64	Otros no especificados
Sección III INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN ROBÓTICA	
64	Percepción
65-67	Actuación
65	Plataformas móviles
66	Manipulación y agarre
67	Materiales
68	Micro y nano robots
69	Arquitecturas e integración
70	Navegación y control
71	Interfases con usuario y otras
72	Otras actividades de I+D no especificadas
73	Investigación básica

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 o el aportar cualidades que no posee el humano (fuerza, precisión, etc.).

Estas características obligan a que los robots de servicio cuenten con un mayor grado de *inteligencia*, 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 éstos cuenten con un mando remoto, siendo en muchas ocasiones robots teleoperados. En el Capítulo 11 se abordan con detalle los tele-robots.

Para dar una idea general de las posibilidades de la robótica en estos sectores, se van a comentar algunas aplicaciones concretas en las que el robot ha aportado mejoras y beneficios al proceso primitivo.

De entre los diferentes sectores de aplicación de la robótica de servicio, se han escogido los siguientes: Agricultura, Construcción, Nuclear, Medicina, Aéreos, Submarinos, Asistenciales y Ocio. Las aplicaciones de la robótica en el sector Espacio, están recogidas en el Capítulo 11, por cuanto éstas están íntimamente ligadas a la telerrobótica.

Estos sectores cubren una buena parte de las aplicaciones de la robótica de servicio identificadas por la IFR. La Tabla 10.3 indica qué aplicaciones, de acuerdo a la clasificación de la IFR (Tabla 10.2), son cubiertas por cada uno de los sectores de aplicación que a continuación se desarrollan.

Tabla 10.3. *Aplicaciones implicadas en los sectores tratados*

Sector considerado	Aplicaciones implicadas según clasificación IFR
Agricultura	18
Construcción	34, 35, 36
Nuclear	32
Medicina	42, 43
Aéreos	31, 47, 48, 49
Submarinos	31, 47, 51
Asistenciales	11, 12, 13
Ocio	6, 7, 8, 56, 57, 58
Espacio	22

10.3.1. Robots en la Agricultura

Son varios los tipos de actividades agrícolas en las que los robots pueden intervenir. Conviene distinguir, por su diferente problemática, entre las actividades bajo invernadero y las actividades de exterior.

Bajo invernadero es posible conseguir un relativo conocimiento y estructuración del terreno por el que el robot deberá moverse, facilitándose en gran medida los desplazamientos e intervenciones de los robots. Más compleja es la estructuración de las plantas y frutos que deben ser manipulados. Tareas como la siembra, el acondicionamiento y preparación del terreno o la recolección de los frutos, son susceptibles de robotización. La movilidad del robot a través de los pasillos del invernadero puede ser abordada de manera similar al caso de los robots móviles que operan en factorías, incluso en ocasiones pueden ser aprovechadas las tuberías instaladas para calefacción o riego como guía para el desplazamiento de los robots. Dada la importancia de manipular plantas y frutos sin que éstos sean dañados y la fragilidad de los mismos, se debe prestar especial atención a esta actividad, tanto con el desarrollo de útiles específicos (garras o pinzas de manipulación, por ejemplo) como con la utilización de sensores adecuados para localizar correctamente los puntos de agarre.

En el caso de cultivos de exteriores, los desarrollos existentes consisten básicamente en la robotización de maquinaria específica para agricultura (tractores, cosechadoras, etc.) a la que se le dota de capacidad de conducción autónoma o teleoperada (Figura 10.20). En este caso, es mucho más difícil garantizar el conocimiento o estructuración del entorno en el que deberá operar el robot, debiendo preverse la presencia de obstáculos desconocidos que dificultarán la movilidad, las condiciones de luz cambiante que afectarán, por ejemplo, a la localización de frutos, o las condiciones climáticas adversas entre otras dificultades añadidas.

La aparición y popularización de los sistemas de navegación por satélite (en la actualidad GPS y en un futuro Galileo) ha resuelto en gran medida los problemas de localización y navegación autónoma inherentes al movimiento por una gran extensión de terreno, con frecuentes deslizamientos de las ruedas u orugas que hacen inservible la navegación inercial.

En [RODRÍGUEZ-05], puede encontrarse un estudio detallado del estado actual y previsión futura de la robotización y automatización en general de la agricultura. En él se citan, entre otros, los siguientes argumentos a favor de la robotización de la agricultura:

- Escasez de mano de obra
- Sustitución de operarios en tareas peligrosas, como la aplicación de productos fitosanitarios.



Figura 10.20. Cosechadora robotizada «Demeter».

- La posibilidad de trabajar en varios turnos, disminuyendo los tiempos de realización de tareas estacionales (campañas de recolección, vendimias, etc.).
- Optimización del uso de los productos fitosanitarios con el correspondiente ahorro y disminución de riesgos ambientales.

10.3.2. Robots en la Construcción

El sector de la construcción es, en la mayoría de los países industrializados, uno de los que moviliza mayor número de recursos económicos y humanos. No es pues de extrañar, que exista un notable interés en el desarrollo de sistemas robotizados, orientados a automatizar en lo posible algunas de las múltiples labores que entran a formar parte de los procesos constructivos [BALAGUER-04].

En este tipo de aplicaciones de la robótica, como en otros muchos, es Japón el país que cuenta con un mayor número de sistemas en funcionamiento. En algunos casos, se trata de robots parcialmente teleoperados, contruidos a partir de maquinaria convencional (grúas, excavadoras, etc.). En otros, es maquinaria específicamente construida para resolver un proceso concreto.

Si se analizan las condiciones existentes para la robotización de la construcción se llega entre otras a las siguientes conclusiones:

- Las condiciones de trabajo son complejas.
- Los robots deben tener capacidad de locomoción y cierto grado de inteligencia.
- Los robots deben estar preparados para trabajar en exteriores, moviéndose en entornos difíciles y no protegidos.
- Deben manejar piezas pesadas y de grandes dimensiones.
- Las operaciones a realizar son complejas, variadas y poco repetitivas.
- Los robots deben ser fácilmente transportables a la obra.

Con estos condicionantes, las posibles tareas robotizables dentro de la construcción de edificios (comerciales, industriales o residenciales) podrían agruparse en [OPPENHEIM-90]:

1. Operaciones de colocación de elementos.
 - Construcción mediante colocación repetitiva de estructuras básicas (ladrillos, bloques, etc.) (Figura 10.21).
 - Posicionamiento de piezas, normalmente grandes y pesadas (vigas, etc.).
 - Unión de diferentes piezas que componen una estructura (soldadura, remaches, etc.).
 - Sellado de las uniones entre diferentes piezas.
2. Operaciones de tratamiento de superficies.
 - Acabado de superficies (pulido, etc.).
 - Recubrimiento de superficies con pintura, barniz, etc.
 - Extensión de material sobre la superficie (cemento, espuma aislante, etc.).
3. Operaciones de rellenado.
 - Vertido de cemento u hormigón en encofrados.
 - Excavación para la preparación de terrenos y movimiento de tierras.
 - Rellenado con tierra de volúmenes vacíos.
4. Otras.
 - Inspección y control.

Fuera de la construcción de edificios, cabría destacar las realizaciones de robots para la construcción de túneles, carreteras (asfaltado), inspección de estructuras en puentes o muros de edificios difícilmente accesibles, etc.

De acuerdo a los datos recogidos por la IFR y UNECE [IFR-04] el número de robots dedicados, a la construcción a finales del año 2003 era de cerca de 3.000 unidades, estando previsto su incremento en unas 1.000 unidades hasta el año 2007.



Figura 10.21. Robot Rocco para la construcción. (Cortesía DISAM-Universidad Politécnica de Madrid).

10.3.3. Robots en la Industria nuclear

Por sus especiales características, el sector nuclear es uno de los más susceptibles de utilizar robots de diseño específico [FOGLE-93]. Entre las diversas aplicaciones se han escogido aquí, por su especial relevancia, las relativas a operaciones de mantenimiento en zonas contaminadas y de manipulación de residuos.

Inspección de los tubos del generador de vapor de un reactor nuclear

Las operaciones de inspección y mantenimiento de las zonas más contaminadas de una central nuclear de producción de energía eléctrica son por naturaleza largas y costosas.

De realizarlas manualmente, el tiempo de exposición de los operadores a la radiación es un factor crítico que, junto con el elevado coste que supone una interrupción temporal del funcionamiento del sistema en cuestión, justifica, sin lugar a dudas, la utilización de sistemas robotizados, normalmente teleoperados, total o parcialmente, que sustituyan al operador.

En el generador de vapor se produce el intercambio de calor entre el fluido primario y secundario. Para ello, dentro de la vasija del generador, se encuentran dispuestas en forma matricial los tubos por los que circula el fluido receptor del calor.

El inevitable desgaste de estos tubos obliga a realizar periódicamente labores de inspección, para que en el caso de que alguno se encuentre dañado inutilizarlo, poniendo en funcionamiento alguno de los tubos de reserva que, a tal fin, se han dispuesto en el generador.

Para realizar esta operación de manera automática puede utilizarse un robot de desarrollo específico que, introducido en la vasija, posicione una sonda de inspección en la boca de cada tubo. Ésta, empujada por el interior del tubo, proporcionará información sobre el estado del mismo.

Es preciso considerar que el robot se introduce en la vasija mediante un sistema mecánico que, junto con los posibles errores en la disposición matricial de los tubos, obliga a que el robot trabaje, bien con ayuda de teleoperación, o bien con sistemas sensoriales externos como visión o láser, que proporcionen la posición real relativa entre el extremo del robot y los tubos.

Manipulación de residuos radioactivos

Como se indicó en el Capítulo 1 y se detalla en el Capítulo 11, los primeros sistemas teleoperados, desarrollados por el *Argonne National Laboratory* (ANL) tuvieron como objetivo la manipulación de productos radioactivos sin riesgo para el ser humano.

La industria nuclear genera una cantidad considerable de residuos radioactivos de baja contaminación (vestimentas, envases de plástico, papel, etc.) o de alta (restos de las células del reactor, materiales en contacto directo prolongado con las zonas radiactivas, etc.). La forma, tamaño y peso de estos desechos es variable y su manipulación tiene por objetivo final su envase en contenedores especiales, que son posteriormente transportados y almacenados (lo que origina una nueva problemática).

Para manipular remotamente estos residuos se hace uso tanto de telemanipuladores con unión mecánica y seguimiento directo del proceso por parte del operador a través de un cristal (caso de baja contaminación), como con sistemas con mando remoto por radio o cable en el caso de contaminación elevada. Estos manipuladores permiten la flexibilidad necesaria para manipular elementos de peso variable y forma no definida (incluso no rígidos).

Además, es preciso considerar la importancia que tiene la optimización del espacio ocupado por los residuos en su almacenamiento, por lo que antes de su envasado en los contenedores puede ser preciso fragmentarlos [LARCOMBE-84].

10.3.4. Robots en Medicina

De entre las varias aplicaciones de la robótica a la medicina destaca la cirugía. Las primeras aplicaciones de la robótica a la cirugía del cerebro datan del año 1982. En esta fecha se comienza en *Memorial Medical Center de Long Beach* (California) un programa cuyo objetivo consistía en utilizar un robot comercial (PUMA 260) para realizar determinadas operaciones de neurocirugía. Desde entonces se han conseguido notables avances que han hecho que la cirugía robotizada sea hoy en día una realidad, existiendo varios productos comerciales con varios años de uso.

La cirugía robotizada tiene dos vertientes de características diferenciadas. La primera de ellas, resulta de aplicar el concepto de CAD-CAM (Diseño asistido por computador - Fabricación asistida por computador) a la cirugía ortopédica. En ésta la inserción de un implante óseo (por ejemplo, para resolver los problemas derivados de una rotura del fémur), precisa de eliminar la parte del hueso inservible y realizar en la parte útil el vaciado necesario para insertar el implante artificial que sustituirá la funcionalidad de la parte del hueso dañada. Para ello el cirujano debe fresar el interior del hueso, procurando conseguir un vaciado en el que encaje con la mayor precisión posible el implante.

Los recursos de imagen médica actuales (Tomografía, Resonancia Magnética, etc.) permiten disponer de una información detallada de las estructuras óseas, siendo posible utilizar esta información en soporte informático para planificar sobre ella el fresado a realizar en el hueso, así como seleccionar las dimensiones más adecuadas de la prótesis a implantar. De esta planificación surge un programa, que será cargado en el robot y ejecutado por éste con total precisión en el quirófano, consiguiéndose un mecanizado del hueso de una calidad muy superior a la conseguida manualmente. Lógicamente, es preciso referenciar adecuadamente los movimientos previstos en la fase de planificación, con la posición real del paciente en el quirófano. Por ello antes del comienzo del trabajo del robot se debe proceder a una fase de referenciado con ayuda de unas marcas insertadas en el hueso del paciente antes de realizar la toma de imágenes. Uno de los sistemas existentes más avanzados en este tipo de actividad es el Robodoc, comercializado por *Integrated Surgical System Inc.*

La otra vertiente de la cirugía robotizada está centrada en la cirugía mínimamente invasiva (MIS). Esta técnica quirúrgica permite abordar determinadas intervenciones mediante la realización de tres pequeñas incisiones en el paciente, por dos de las cuales se introducen el instrumental quirúrgico, que es manejado por el cirujano desde el exterior, mientras que por la tercera incisión se introduce una cámara (endoscopio) que permite observar la posición del instrumental y el interior del cuerpo del paciente.

La técnica MIS es aplicable a diferentes fines como, por ejemplo, la cirugía del tórax, prostatectomía, cirugía cardíaca, o la extracción de vesícula biliar, siendo sus ventajas más significativas, la reducción de trauma operatorio, una menor pérdida de sangre durante la intervención, la disminución del riesgo de infección o la disminución de las molestias postoperatorias y del tiempo de recuperación. Su ejecución es compleja, precisando de un equipo de cirujanos muy especializados, lo que limita su grado de implantación.

La participación de la robótica en la cirugía mínimamente invasiva, se materializa en el uso de tele-robots. El cirujano, que no tiene porqué estar presente en el quirófano, maneja los dispositivos de control remoto del robot que a su vez manipula el instrumental y la cámara en-

doscópica en el interior del cuerpo del paciente. Para ello dispone de la imagen proporcionada por la cámara y de las sensaciones de fuerza y tacto (hápticas) que reproducen las fuerzas que aparecen en el contacto entre los instrumentos manipulados por los robots y el paciente. Entre las órdenes generadas por los movimientos por el cirujano y los efectuados por el robot, así como entre las fuerzas captadas por los robots y las transmitidas al cirujano, se intercala un sistema informático que permite el procesamiento de los datos, siendo en éste en donde radican las ventajas de esta técnica. Este procesamiento de los datos permite, por ejemplo, eliminar el temblor fisiológico que puede experimentar el cirujano (crítico en intervenciones de precisión), escalar los movimientos de éste facilitando así la micro-cirugía, fijar zonas prohibidas en el interior del paciente garantizando así, por ejemplo, que no se originen hemorragias críticas por el seccionamiento involuntario de vasos sanguíneos o automatizar el movimiento de la cámara endoscópica de modo que los instrumentos quirúrgicos queden siempre dentro de la imagen.

Existen varios sistemas comerciales para el desarrollo de cirugía mínimamente invasiva con ayuda de tele-robots. Entre ellos pueden citarse los sistemas *DaVinci de Intuitive Surgical Inc.* (Figura 10.22) que proporciona un sistema completo de cirugía mínimamente invasiva mediante telerobots o el *AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning)* de Computer Motion, que automatiza los movimientos de la cámara.

Una ventaja futura adicional del uso de tele-robots en la cirugía se encuentra en las operaciones remotas, que permitirán la participación de equipos médicos muy especializados sin precisar que se encuentren en el quirófano. Por el momento este tipo de intervenciones sólo se han realizado de manera experimental como consecuencia de los problemas derivados de los retrasos originados en la transmisión de la señal por las distancias (véase la problemática del retraso temporal en el Capítulo 11).

Otro interesante uso de la robótica en medicina es su utilización como máquina para la rehabilitación de pacientes con movilidad limitada.

El sistema Lokomat es una ortosis robotizada, desarrollado por *Hocoma Medical Engineering* (Figura 10.23) para ser utilizada en la terapia rehabilitadora de la marcha de pacien-



Figura 10.22. Sistema DaVinci de cirugía mínimamente invasiva mediante telerobots (Cortesía Intuitive Surgical Inc.)



Figura 10.23. Sistema Lokomat para rehabilitación de la marcha. (Cortesía Hocoma).

tes con daños medulares u otros trastornos neuronales que impidan o dificulten el caminar. El sistema consta de un arnés que suspende al paciente, una cinta de marcha y un exoesqueleto robótico, todos controlados por un computador que regula la velocidad de la cinta y el movimiento del exoesqueleto fijado a las piernas de acuerdo a un programa de entrenamiento preestablecido, a la vez que monitoriza la marcha del paciente. Su objetivo, basado en la plasticidad neuronal es, fundamentalmente, el de entrenar al paciente en el gesto de la marcha, para conseguir su reeducación, de modo que las señales neuronales de la marcha, generadas en el cerebro, encuentren nuevas vías alternativas a las dañadas o interrumpidas, para llegar hasta los músculos implicados en el movimiento. Adicionalmente a esta función reeducadora, el sistema consigue movilizar el sistema músculo esquelético contribuyendo a evitar su atrofia.

Pueden encontrarse sistemas similares para la rehabilitación neuromuscular de otras partes del cuerpo, permitiendo incorporar la capacidad de ofrecer una resistencia controlada al paciente.

10.3.5. Robots aéreos y submarinos

Los robots aéreos y submarinos, son básicamente vehículos autónomos, capaces de desplazarse por sus respectivos medios, transportando una carga de pago o instrumentación destinada al desarrollo de una misión concreta.

Su desarrollo inicial fue impulsado sobre todo por la industria militar, interesada en disponer de sistemas que facilitaran la localización y recogida de armamento submarino, o de servir como blanco móvil o elemento para la observación remota en el caso de los robots aéreos.

Posteriormente, su uso se ha extendido a aplicaciones civiles de muy diversa índole, contando en la actualidad con un número destacado de unidades operativas, dedicadas sobre todo a aplicaciones relacionadas con la inspección, la vigilancia o la seguridad, junto a otras como el medio ambiente o el cine.

En el caso de robots aéreos pueden encontrarse tanto aeroplanos, dirigibles, helicópteros u otros vehículos de aterrizaje y despegue vertical. Mientras que los aeroplanos permiten grandes velocidades y alcances, los helicópteros aportan su capacidad de vuelo estacionario y maniobrabilidad a pesar de su complejo control. Por su parte los dirigibles son intrínsecamente estables y precisan de un consumo de energía mínimo, lo que junto a su poco nivel de ruido los hace adecuados en ciertas aplicaciones a pesar de su baja relación tamaño-capacidad de carga y mala maniobrabilidad.

Por su parte los robots submarinos, fueron inicialmente operados remotamente (ROV) mediante un cable que los unía con el buque nodriza o con una estación submarina intermedia. Las limitaciones impuestas por este cable de unión, llevaron al desarrollo de los vehículos submarinos autónomos (AUV). De acuerdo a los datos recogidos por la Federación Internacional de Robótica [IFR-04], a finales del año 2003 había 4.875 robots submarinos operativos, siendo el tipo de robots de servicio que cuenta con mayor número de instalaciones. Las dimensiones y capacidades de los robots submarinos pueden variar desde los de estructura ligera, destinados a trabajar en pequeñas profundidades (hasta pocos cientos de metros) a los de mayor envergadura, capacitados para sumergirse a profundidades de hasta varios miles de metros. Junto a su propia instrumentación necesaria para proporcionales autonomía, van dotados de cámaras y sistemas de iluminación y en ocasiones de brazos manipuladores destinados a realizar operaciones de reparación, mantenimiento o toma de muestras.

Las aplicaciones de los robots aéreos y submarinos son amplias. El mantenimiento de infraestructuras de larga longitud y de difícil acceso, como gaseoductos, líneas de energía eléctrica o líneas de comunicación submarina, que pueden implicar instalaciones de varios cientos de kilómetros, precisa de una periódica revisión de todo su recorrido. Estas revisiones precisan para su realización medios económicamente costosos y que implican ciertos riesgos, como helicópteros para el caso de instalaciones terrestres, o de minisubmarinos unidos a barcos mediante un cable para el caso de instalaciones submarinas. La utilización de vehículos aéreos autónomos (UAV - *Unmanned Aerial Vehicles*) (Figura 10.24) para el primer caso o de submarinos autónomos (AUV - *Autonomous Underwater Vehicle*) (Figura 10.25) para el segundo, permite disminuir los riesgos y los costes y con ello aumentar la periodicidad de la inspección. El uso de estos sistemas puede ser igualmente útil en la inspección de obras civiles, como presas, acueductos o diques.



Figura 10.24. Robot aéreo autónomo (UAV). (Cortesía Universidad Politécnica de Madrid).

La Tabla 10.4 recoge una serie de posibles aplicaciones civiles para los robots aéreos y submarinos.

Tabla 10.4. *Aplicaciones de los robots aéreos y submarinos*

Aplicaciones de los robots aéreos
<p>Toma de imagen aérea (cine, publicidad, retransmisiones deportivas). Vigilancia medioambiental (incendios). Inspección de obra civil (presas, acueductos, puentes). Inspección de infraestructuras (tendidos eléctricos, oleoductos, etc.). Reconocimiento en zonas de desastre (desastres medioambientales, desastres naturales). Fumigación de campos de cultivo. Localización de bancos de pesca. Levantamientos topográficos.</p>
Aplicaciones de los robots submarinos
<p>Localización de restos arqueológicos. Localización de cargas submarinas. Inspecciones de cascos de buques para mantenimiento o tras siniestro. Inspecciones de fondo marino con fines biológicos (observación de especies). Inspecciones para fondo marino para explotación de recursos (acuicultura). Inspección y mantenimiento de plataformas petrolíferas. Inspección y mantenimiento de conducciones submarinas. Inspecciones de tendido de cable submarino.</p>

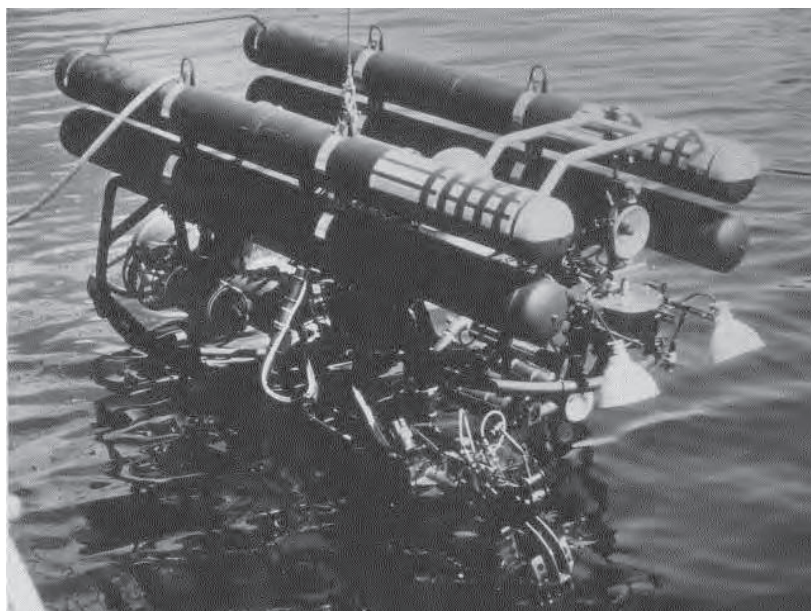


Figura 10.25. Robot submarino CURV.

10.3.6. Robots asistenciales

La necesidad de atender al creciente colectivo de personas mayores y el interés de dotar del mayor grado de independencia posible a las personas que por alguna causa tienen la movilidad limitada, origina que el desarrollo de robots asistenciales sea de un interés social destacado. Posiblemente, los precios de la tecnología utilizada y del esfuerzo de I+D necesario para su desarrollo, sean el principal motivo de su limitada difusión, que según la Federación Internacional de Robótica, se limitaba a 260 unidades a finales del año 2003 (con una previsión de 1.640 unidades más para finales del 2007).

Las sillas de ruedas parcial o totalmente autónomas, incorporan a las sillas motorizadas sistemas de navegación y control, que las permiten moverse por entornos no estructurados, bien añadiendo funciones de seguridad para el caso de que sean conducidas por usuarios con capacidades senso-motoras limitadas (falta de percepción de parte del entorno, ausencia de movilidad en todas las extremidades, movimientos espasmódicos, etc.), o bien haciéndose cargo plenamente de las funciones de movimiento a partir de la indicación del destino por parte de un usuario que no pueda realizar el guiado directo de la silla.

La robótica puede contribuir en gran medida a dotar de independencia y con ello de calidad de vida, a aquellas personas que por tener una movilidad limitada precisan de ayuda para el desarrollo de sus actividades diarias más básicas (aseo, alimentación, etc.). Existen diferentes desarrollos de robots manipuladores, especialmente diseñados para este fin (Figura 10.26). En ellos es importante enfatizar las capacidades de interfase con el usuario y de seguridad, puesto que entrarán en contacto directo con las personas.

Dada la necesidad de que el robot esté siempre cerca del usuario a pesar de que éste se desplace por su vivienda, estos robots suelen montarse sobre la propia silla de ruedas, en caso de que se use, o deben de ser fáciles de transportar y fijar sobre un soporte móvil por parte de alguna persona que ayude al usuario final. En la actualidad, existen diferentes proyectos de investigación que tienen por objeto el desarrollo de robots móviles dotados de brazos manipuladores e interfases humano-robot avanzadas con el objeto de dar un número amplio de servicios a las personas con discapacidad (Care-O-bot, Morpha, etc.)



Figura 10.26. Robot asistencial MATS. (Cortesía Universidad Carlos III de Madrid).

10.3.7. Robots para el ocio

Dentro de esta aplicación de los robots de servicio, se engloban todos los usos en los que el robot contribuye de alguna manera en actividades de ocio de las personas. Sin ser excluyentes, entre estas actividades se pueden citar:

- Robots para hostelería (comida rápida, servicio de bebidas a gusto del cliente).
- Robots figurantes para parques temáticos (Animatrónica).
- Robots para parques de atracciones (Robocoaster).
- Robots guías para museos y exposiciones.
- Robots juguetes y mascotas.

La automatización de la preparación de comida rápida como pizzas o bebidas (cócteles) a gusto del cliente puede ser abordada con relativa facilidad con la ayuda de la robótica. El uso de un robot en este tipo de tareas, frente a sistemas automáticos más convencionales, agiliza el desarrollo, da al sistema una gran flexibilidad y le incorpora unas apreciables cualidades de reclamo comercial. Para este tipo de aplicaciones suelen usarse robots manipuladores convencionales (en el caso de manipulación de alimentos, preparados para trabajar en ambientes limpios), coordinados con los alimentadores y demás periféricos que componen la célula.

El robot Robobar, desarrollado y comercializado por Motoman en diferentes versiones, utiliza un brazo doble (Dual-Arm DA-20) que a modo de brazos se montan sobre un eje vertical giratorio que ejerce de torso (Figura 10.27). Uno de los brazos manipula las botellas mientras que el otro maneja el vaso. A su alrededor se disponen botellas, dispensadores de hielo, bebidas no alcohólicas, etc. El consumidor, solicita la bebida a través de una pantalla táctil, que es preparada por el robot a la vista del usuario. De acuerdo al fabricante el uso de Robobar aporta entre otras ventajas: un mejor control de las materias primas, homogeneidad en las mezclas preparadas, reducción de coste frente a la mano de obra, funcionamiento continuo 24 horas.



Figura 10.27. Robot Barman «Robobar». (Cortesía Motoman).

En las últimas décadas el número de parques temáticos y parques de atracciones ha crecido considerablemente, ofreciendo junto a las atracciones clásicas (norias, montañas rusas, etc.) otras nuevas, en las que se procura ambientar con realismo otras civilizaciones, paisajes o situaciones.

Las atracciones basadas en desencadenar sensaciones de vértigo en base a someter a los clientes a aceleraciones elevadas y movimientos contra la gravedad, pueden utilizar robots como sistema de actuación alternativo a las plataformas convencionales. El uso de robots para este cometido, proporciona una gran amplitud de movimientos a la vez que aporta la robustez y facilidad de puesta en marcha y mantenimiento asociados a un producto comercial como es un robot. Uno de los fabricantes de robots más destacados, Kuka, comercializa el robot Robocoaster. Éste es un robot articulado de 6 grados de libertad con un alcance de 6.750 mm, que está dotado en su extremo de un asiento doble. A partir de un programa predefinido o configurado por el propio usuario, el robot realiza todo tipo de movimientos, transportando en su extremo a 2 pasajeros (Figura 10.28)

Los maniquís robotizados con aspecto humano o animal se utilizan con frecuencia como figurantes en el cine o en las atracciones de los parques temáticos. El destacable grado de realismo se consigue en base a un complicado sistema de actuadores y control. Estos sistemas son, por tanto, dispositivos robóticos hechos a medida, con un número elevado de grados de libertad y con una programación generalmente basada en el aprendizaje o guiado.

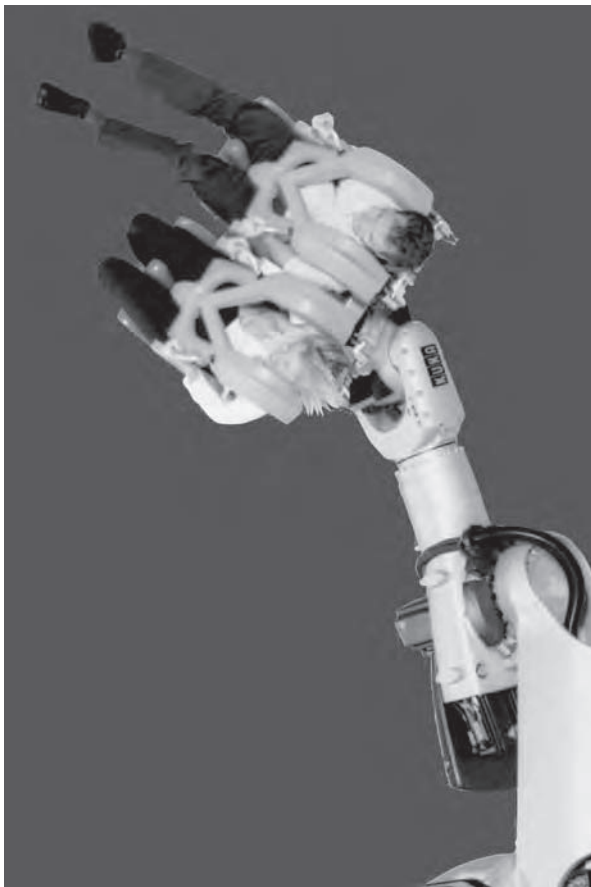


Figura 10.28. Robot ROBOCOASTER. (Cortesía de Kuka).



Figura 10.29. Robot Maggie. (Cortesía Universidad Carlos III de Madrid).

Cabe citar también como una actividad cercana al uso de los Robots en los parques temáticos, su empleo como guías para museos, salas de exposiciones o ferias. Éstos, no persiguen necesariamente la imitación de un ser vivo en cuanto a forma o movimientos, pero ven aumentada su necesidad de interacción, pues deben responder a las demandas de los visitantes, en muchas ocasiones más fascinados por el propio Robot que por la visita guiada (Figura 10.29). La problemática asociada al desarrollo de este tipo de robots es amplia, debiendo resolverse aspectos de navegación por un entorno con obstáculos móviles, aspectos de seguridad y robustez derivados de la interacción directa con el público y aspectos de comunicación e interfase tratando de facilitar el diálogo entre humano y máquina y el acercamiento entre ambos.

Por último, dentro de los robots dedicados al ocio cabe considerar los robots juguete o mascota, que están paulatinamente incorporando funciones más complejas y abaratando sus precios. Junto a los aspectos mecánicos y de control de movimiento comunes en gran medida a otros casos, estos robots suelen incorporar capacidades avanzadas de interacción con el usuario, que hacen que éste adopte con el robot un trato cercano al que tendría con una mascota real. Para ello, el robot puede incorporar modos de comportamiento evolutivo, de modo que éste se va modificando en base a la respuesta que observa en el humano ante determinadas actitudes. De este modo, de la misma manera que un ser vivo dotado de cierta inteligencia, el robot va aprendiendo cuál es el tipo de relación que debe mantener con su entorno y, en particular, con el humano para obtener un indeterminado beneficio. Tras el hito del perro robótico AIBO fabricado por Sony, otros fabricantes comercializan robots mascotas como el gato Necoro de OMRON (Figura 10.30), o el iCat de Philips



Figura 10.30. Gato Robot NECORO. (Cortesía Omron).

10.4. EJERCICIOS RESUELTOS

Ejercicio 10.1

La Figura 10.31 muestra a un robot industrial trabajando en un proceso. Indicar para esta aplicación (independientemente del caso concreto mostrado en la imagen):

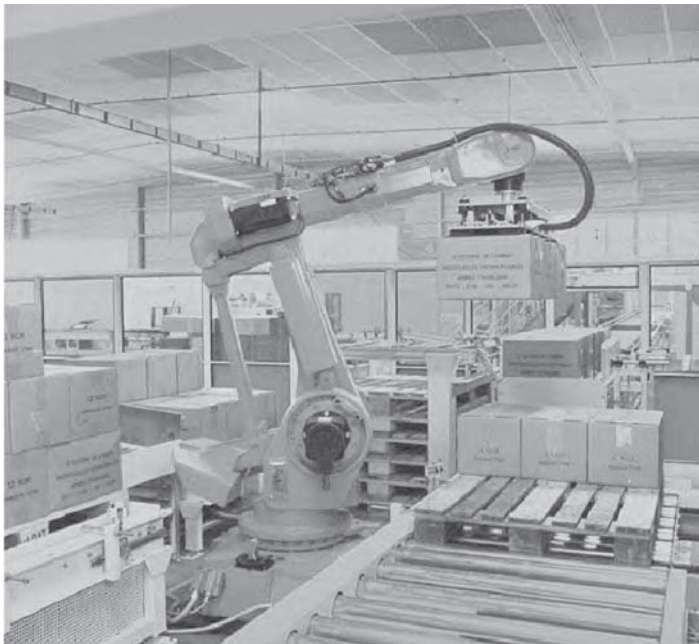


Figura 10.31. Célula robotizada ejercicio 10.1.

- a) Aplicación en la que trabaja el robot.
- b) Tipo de configuración del robot.
- c) Modo de programación que se le presupone.
- d) Capacidad de carga.
- e) Número de grados de libertad.

Solución:

El proceso mostrado en la imagen corresponde al paletizado de cajas. Para este tipo de aplicaciones son adecuados robots que trabajen con facilidad en la dirección vertical, como son el cartesiano, Scara y articular, este último por la flexibilidad que tiene para adaptarse a diferentes tareas. Una adecuada concepción de los elementos periféricos puede permitir el uso de robots de 4 grados de libertad, si bien el uso de estas alternativas, frente a la de 6, debe ser evaluada teniendo en cuenta posibles aplicaciones complementarias o futuras del robot. Las características del paletizado, recomiendan una programación en la que sea fácil la indexación de las posiciones de destino del robot, de manera que todas las localizaciones del mosaico puedan ser definidas a partir de una posición inicial. Por ello la programación textual es la más adecuada, utilizando instrucciones que calculen la posición del destino del robot a partir de la inicial y de los adecuados desplazamientos. Si bien la capacidad de carga del robot dependerá del peso de los productos a paletizar, por lo general, y en particular en la imagen mostrada, se precisa de robots con una capacidad de carga media de 50 a 150 kilogramos.

Por tanto, respondiendo de manera directa a las cuestiones del enunciado se tendrá:

Aplicación en la que trabaja el robot	Paletizado
Tipo de configuración del robot	Articular
Modo de programación que se le presupone	Textual
Capacidad de carga	50-150 kg
Número de grados de libertad	6 (existen robots articulares de 4 gdl específicos para paletizado)

Ejercicio 10.2

Indicar si las siguientes afirmaciones, referidas a un robot aplicado a la soldadura al arco, son verdaderas o falsas

- a) Es imprescindible una elevada capacidad de carga.
- b) Es imprescindible un control continuo de trayectoria.
- c) Es imprescindible el uso de sensores externos para realizar movimientos acomodaticios.
- d) Es imprescindible el manejo de E/S digital.

Solución:

Un robot de soldadura al arco maneja una antorcha de soldadura cuyo peso es ligero. Su trabajo se desarrolla siguiendo el perfil tridimensional de las piezas a unir mientras se aplica al cordón de soldadura. Las incertidumbres en el acabado de las piezas a unir, en su fijación en los utillajes o en la ubicación de estos mismos, puede ser opcionalmente resuelta incor-

porando al robot un sistema de seguimiento de cordón. El proceso de soldadura debe quedar integrado con el movimiento del robot, tanto en los aspectos básicos (encendido y apagado de la antorcha, alimentación del hilo, etc.) como en los más complejos (adecuación de la tensión e intensidad o la distancia a la pieza).

Estas razones justifican la siguiente respuesta a los apartados del enunciado:

Es imprescindible una elevada capacidad de carga	FALSO
Es imprescindible un control continuo de trayectoria	VERDADERO
Es imprescindible el uso de sensores externos para realizar movimientos acomodaticios	FALSO (no es imprescindible)
Es imprescindible el manejo de E/S digital	VERDADERO

Ejercicio 10.3

El proceso de fabricación del queso Gruyère, acaba con una fase de maduración, en la que los quesos son depositados en una zona de maduración (sótano de maduración) que conserva unas condiciones ambientales constantes de 12 °C y 95% de humedad. Adicionalmente, la atmósfera del sótano de fermentación contiene gas amoníaco. De manera periódica es preciso dar la vuelta al queso. Además, las cortezas de los quesos tienen que ser limpiadas y untadas con una regularidad aproximada de 5 días con determinadas sustancias (principalmente agua salada), a la vez que se controla el grado de maduración. Todo este proceso dura unos 10 meses.

Una determinada fábrica de quesos dispone de un sótano de maduración que cuenta con 2 estanterías lineales, dispuestas en 1 pasillo de 10 metros de largo y 2 metros de alto, en las que se depositan los quesos de 35 kg y forma cilíndrica de 60 cm de diámetro y 10 de alto. De esta manera, dejando el necesario entre quesos y estantes, cada estantería contiene 120 quesos en proceso de maduración (12×10), con un total por consiguiente de 240 quesos en el sótano.



Figura 10.32. Sótano de maduración de queso Gruyère.

Proponer una solución robotizada, para la manipulación que implica el proceso antes indicado, especificando el tipo de robot a utilizar y características, y argumentando las ventajas que esta solución aportaría a la actual manipulación manual.

Nota: la solución propuesta es una aproximación académica, sin el rigor de definición del proyecto necesario en una solución real.

Solución:

Las tareas que se pretende robotizar serían las correspondientes a:

- Entrada de piezas de queso desde el exterior al sistema.
- Colocación del queso en una ubicación determinada de la estantería.
- Volteo periódico de cada pieza, según programa.
- Limpieza del exterior de las piezas y aplicación de sustancias (en una primera fase puede ser realizada manualmente a la vez que se hace un control del estado de maduración).
- Salida de pieza por petición y según grado de maduración.

En la definición de la solución, cabe tener en cuenta entre otras las siguientes particularidades de la aplicación:

- Disposición lineal de las estanterías y su longitud.
- Posicionamiento del robot frente a la pieza mediante desplazamiento XZ y avance Y de distancia fija.
- Rotación de la pinza de valor fijo (180°) para volteo de las piezas.
- Eventual rotación de paso fijo (90°) de la base del robot para la entrada o salida de piezas del sótano o su transporte a la zona de limpieza y aplicación de sustancia.
- Manipulación de alimentos en condiciones de humedad y temperatura que facilitan la proliferación de microorganismos.

Con estos condicionantes se proponen a priori dos posibles soluciones:

La primera consiste en el uso de un robot de tipo cartesiano XZ y con desplazamiento Y a distancia fija (control todo-nada). El cabezal se posicionará en la coordenada X adecuada, elevándose hasta la cota Z, momento en el que la pinza entrará una distancia que puede ser controlada de manera binaria. El giro de la pieza se debe de hacer fuera de la estantería, mediante un volteo de 180° del alabeo de la pinza. Se incorpora, además, la capacidad de desplazar desde el centro al lateral del cabezal las piezas extraídas permitiendo así la entrada y salida por los extremos del pasillo. Los desplazamientos XZ del robot y su servo control se conseguirán mediante unidades lineales modulares comerciales. El avance y retroceso de la pinza frente a la estantería, el volteo de las piezas y los desplazamientos centro lateral de las piezas, se realizará mediante un control todo nada. Todos los actuadores serán eléctricos evitando la conducción de aire comprimido y el necesario tratamiento previo del aire. La pinza estará dotada de sensores de presencia que le ayuden a centrarse sobre la pieza, en caso de desajustes, y garanticen en todo momento que no se producen colisiones con los quesos o estantería.

La segunda alternativa consistiría en el uso de un robot manipulador articular comercial montado sobre vía. Puede considerarse la posibilidad de que la vía sea aérea, quedando el ro-

bot suspendido y de esta manera permitiendo el paso de personas al interior del pasillo en caso de necesidad. En caso de que la distancia entre las dos estanterías del pasillo no permita el giro sobre el eje vertical del robot para enfrentarse a ambas estanterías, el giro puede realizarse fuera del pasillo, debiendo de planificarse las acciones de modo que se procese el mayor número de quesos sobre una de las estanterías antes de girar para procesar las de la otra.

Un enfoque alternativo a los anteriores sería el de sustituir el desplazamiento longitudinal a lo largo de la estantería mediante vía, por un robot móvil que dispondría de mayor capacidad de movimiento siendo por ello adecuado a instalaciones con varios pasillos (véase Figura 10.33 www.sugnaux.com).



Figura 10.33. Robot específico para el curado de quesos. (Cortesía Sugnaux).

En ambos casos el peso del queso, incrementado en el peso del útil terminal, determina la capacidad de carga del robot (unos 50 kg). El alcance vertical del mismo debe ser superior a los 2 metros. Dado que el número de piezas a manipular por unidad de tiempo es bajo, no se precisan velocidades ni aceleraciones elevadas, por lo que las inercias serán limitadas a pesar del peso de la carga.

El sistema de control del robot, deberá estar conectado con un ordenador de gestión del sótano de maduración, responsable de determinar los ciclos de manipulación, gestionar la ubicación y posible rotación de los quesos en la estantería, gestionar la salida de quesos de acuerdo a su tiempo de maduración, y desarrollar una adecuada interfase con el usuario.

En ambos casos, se deberá prever una zona al final del pasillo para mantenimiento del robot, sirviendo, además, como zona de vía muerta para el caso en que se deba trabajar manualmente en la estantería.

Las ventajas de la robotización del proceso son en primer lugar las derivadas del entorno de trabajo (temperatura baja, humedad elevada, presencia de gas amoníaco, necesidad de garantizar la higiene). En segundo lugar las derivadas de la mecanización de la gestión. El uso de un sistema informático y la no intervención humana garantiza el desarrollo preciso del plan de maduración establecido y el conocer en todo momento el estado preciso de cada queso.

10.5. BIBLIOGRAFÍA

- [APPLETON-87] E. Appleton y D. J. Williams, *Industrial Robot Applications*, Halsted Press, John Wiley and Sons y Open University Press, 1987.
- [BALAGUER-04] C. Balaguer, «Nowadays trends in robotics and automation in construction industry: Transition from hard to soft robotics», 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISANRC-04), Corea del Sur, 2004.
- [DRAUGHTON-93] R. N. Draughton, «Robotic ultrahigh-pressure waterjet cutting», en: *Robotics for Competitive Industries*, Mechanical Engineering Publications Limited, Londres, 1993.
- [ENGELBERGER-80] J. F. Engelberger, *Robotics in Practice*, Kogan Page, Londres, 1980.
- [ENGELBERGER-89] J. F. Engelberger, *Robotics in Service*, Kogan Page, Londres, 1989.
- [FOGLE-93] Fogle, R. F., «Robots and teleoperators in radioactive applications», en: *Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments*, Ed. M. Jamshidi y P. J. Eicker, Prentice-Hall, 1993.
- [GROOVER-89] M. P. Groover, *et al.*, «Aplicaciones de robot en fabricación», en: *Robótica industrial. Tecnología, programación y aplicaciones*, McGraw-Hill, Madrid, 1989.
- [IFR-04] International Federation of Robotics and United Nations. *World Robotics 2004. Statistics, Market Analysis, Forecast, Case Studies and Profitability of Robot Investment*, United Nations Publications, 2004.
- [IFR-05] International Federation of Robotics and United Nations. *World Robotics 2005. Statistics, Market Analysis, Forecast, Case Studies and Profitability of Robot Investment*, United Nations Publications, 2005.
- [LARCOMBE-84] Larcombe y J. R. Halsall, *Robotics in Nuclear Engineering*, C.E.C., EUR 9312EN, 1994.
- [NOF-99] S. Y. Nof, *Handbook of Industrial Robotics*, John Wiley & Sons, 1999.
- [NOSTRAND-90] J. W. Nostrand y E. L. Sampson, «Robots in Service Industry», en: *Concise International Encyclopedia of Robotics*, Editor R. C. Dorf, John Wiley & Sons, 1990.

- [OPPENHEIM-90] J. J. Oppenheim, «Robots in Construction», en: *Concise International Encyclopedia of Robotics* (Editor. R. C. Dorf), John Wiley and Sons, 1990.
- [RODRÍGUEZ-05] F. Rodríguez Díaz y M. Berenguer «Control y Robótica en Agricultura», Universidad de Almería. Servicio de publicaciones, 2005.
- [SCHRAFT-02] R. D. Schraft y G. Schmierer, *Service Robots*, AK Peters, 2000.