

Control de robots con acomodación activa

Luis Basañez y Raúl Suárez⁽¹⁾

El concepto de acomodación se puede definir como el proceso que modifica la trayectoria del robot en función de las fuerzas de reacción que actúan sobre él, debidas a su interacción con otros objetos del espacio de trabajo. En el artículo siguiente, después de una exposición introductoria, se plantean los conceptos de restricciones naturales, artificiales y de marco de acomodación, pasando luego a exponer las características de la acomodación pasiva y activa. A continuación se desarrollan las dos principales estrategias de control con acomodación activa y como último apartado se describe un ejemplo de tarea donde se resumen los diversos aspectos de la misma.

El artículo se cierra con unas breves conclusiones y el esbozo de algunas perspectivas y tendencias del futuro de la acomodación activa.

Los robots industriales actuales pueden considerarse esencialmente sistemas mecánicos articulados capaces de describir trayectorias y posicionarse de acuerdo con las instrucciones de un programa previamente almacenado en una memoria. En este sentido, el éxito de las operaciones realizadas por una gran parte de los robots actuales depende en gran medida de la rapidez y, sobre todo, de la precisión y repetitividad de su posicionamiento y del conocimiento perfecto de las posiciones deseadas. Estos requisitos son tanto mayores cuanto más delicada es la operación a realizar, y pueden alcanzar valores muy elevados en tareas como las de montaje, que involucran contacto físico entre objetos manipulados por el robot y objetos externos a él.

El operador humano posee, en general, una precisión y repetitividad claramente inferiores a las de muchos ro-

bots. Sin embargo, y aún prescindiendo de su capacidad visual, el ser humano puede realizar con gran facilidad operaciones como insertar dos piezas, colocar un tornillo, abrir una puerta, girar una manivela, desplazar un patín a lo largo de una guía o apoyar un objeto sobre una mesa sin golpearlo ni dejarlo caer. Todas estas tareas exigirían, para ser correctamente realizadas, un control ideal de posición junto con un perfecto conocimiento de las posiciones a alcanzar. Pero el ser humano no calcula a priori la trayectoria a seguir con la mano al abrir o cerrar una puerta, tampoco prevee al girar una manivela el círculo exacto que debe describir y su idéntica repetición en cada vuelta e, igualmente, se puede afirmar que la manera más común de realizar una inserción es apoyar primero la pieza en un lado del agujero y luego corregir su posición manteniendo el contacto hasta realizar totalmente la operación.

La acción humana suple su falta de precisión, repetitividad e información

precisa, con una continua adaptación de la acción al desarrollo de la misma, que detecta mediante sus sentidos. En el caso de las tareas mencionadas, esta adaptación se lleva a cabo en gran medida en función de los esfuerzos producidos en la realización de las mismas.

Dotar al robot de gran precisión y repetitividad para hacerlo apto para dichas tareas eleva considerablemente su coste y, en todo caso, siempre existirá una limitación en las prestaciones alcanzables. Una solución alternativa es intentar emular de alguna manera el modo de operación humano, anteriormente comentado, extendiéndolo a la robótica. Este intento ha tenido su plasmación en el concepto de «acomodación».

La acomodación(*) se puede definir como el proceso que modifica la trayectoria del robot en función de las fuerzas de reacción que actúan sobre él, debidas a su interacción con otros objetos del espacio de trabajo. De la definición misma se pueden extraer algunas características o particularidades de la acomodación:

- Las trayectorias efectivamente descritas y las posiciones alcanzadas pueden diferir de las inicialmente previstas.
- Para operar en función de las fuerzas de reacción es necesario conocerlas; por tanto, deben incluirse sensores de fuerza o, en su caso, dispositivos sensibles a las mismas.
- Debe existir interacción entre el robot (o algún objeto rígidamente

(*) Palabra adoptada como equivalente técnica, no literal, de la inglesa «compliance»: conformidad, cumplimiento, condescendencia.

(1) Instituto de Cibernética, CSIC-UPC, Barcelona

Control de robots con acomodación activa

sujeto en su pinza) y otro elemento del espacio de trabajo, de tal forma que aparezcan restricciones de movimiento en al menos un grado de libertad, a fin de que puedan existir fuerzas de reacción.

La acomodación referida a tareas de ensamblado, su inmediato mayor campo de aplicación, ha sido estudiada por Nevins y Whitney (1980), tanto en lo que hace referencia a acomodación pasiva como a acomodación activa. Whitney (1982) ha tratado especialmente el problema de la inserción de piezas cilíndricas y sus relaciones geométricas óptimas. El estudio de las restricciones y la elección de las direcciones sobre las que realizar la acomodación ha sido llevado a cabo por Raibert y Craig (1981), Mason (1979, 1981) y Lee y Huang (1985). Sobre la ubicación de sensores de fuerza, sus ventajas y desventajas, puede citarse Shimano y Roth (1983). Estrategias de acomodación han sido desarrolladas por numerosos investigadores. La realimentación explícita aparece por primera vez en Groome (1972) y Silver (1973), continuada luego por Hanafu-

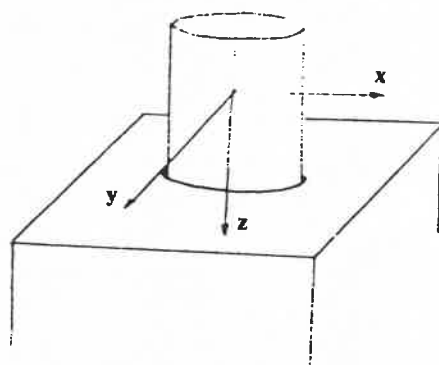
sa y Asada (1977a, 1977b), Salisbury (1980) y Lozano Perez (1983), entre otros. El control híbrido aparece con Inoue (1971), y es posteriormente desarrollado por Paul y Shimano (1976), Mason (1981), Raibert y Craig (1981) y Zhang y Paul (1985), entre otros.

En este artículo se expone el concepto de acomodación, a partir de su definición y objetivos, para hacer luego especial énfasis en las estrategias de acomodación activa. En el apartado 1 se introducen los conceptos de restricciones naturales y artificiales y de marco de acomodación. En el 2, se plantean los conceptos de acomodación pasiva y acomodación activa, mostrándose sus principales ventajas y desventajas. En el caso de acomodación activa se comentan distintos tipos de medición de esfuerzos según el lugar de ubicación de los sensores. El 3 está dedicado al desarrollo de las dos principales estrategias de control con acomodación activa: realimentación explícita y control híbrido; y dentro de cada una de ellas se exponen diferentes propuestas de solución.

En realimentación explícita se comenta la propuesta de Salisbury (1980), y en control híbrido las propuestas de articulaciones libres de Paul y Shimano (1976), de control híbrido de posición/fuerza de Raibert y Craig (1981), y de control híbrido modificado de Zhang y Paul (1985). El apartado 4 muestra un ejemplo de tarea donde se resumen los diversos aspectos de la acomodación activa. Finalmente, en el 5 se exponen unas breves conclusiones y se esbozan algunas perspectivas y tendencias del futuro de la acomodación activa.

1. RESTRICCIONES Y MARCO DE ACOMODACION

La dirección y sentido de las fuerzas de reacción en la interacción entre objetos depende de la superficie de contacto entre ellos, y de los grados de libertad que queden restringidos. Estas restricciones pueden expresarse sobre un sistema de coordenadas adecuado llamado «marco de acomodación» (Mason 1979, 1981; Paul y Shimano 1976; Raibert y Craig 1981).



a)

a) Tarea: insertar un cilindro en un agujero.

Restricciones naturales:

$$p_x = 0 \quad q_x = 0$$

$$p_y = 0 \quad q_y = 0$$

$$f_z = 0 \quad \tau_z = 0$$

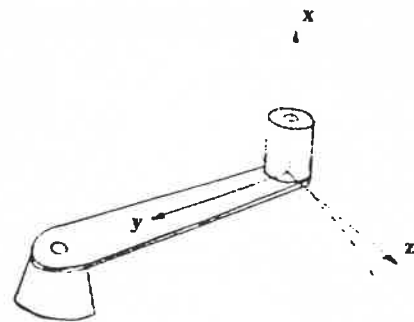
Restricciones artificiales:

$$f_x = 0 \quad \tau_x = 0$$

$$f_y = 0 \quad \tau_y = 0$$

$$p_z = P1(*) \quad q_z = 0(**)$$

(*) Indican que se quiere llevar el cilindro hasta la posición P1 sin girarlo.



b)

b) Tarea: girar una manivela

Restricciones naturales:

$$p_x = 0 \quad \tau_x = 0$$

$$p_y = 0 \quad q_y = 0$$

$$f_z = 0 \quad q_z = 0$$

Restricciones artificiales:

$$f_x = 0 \quad q_x = Q(t)$$

$$f_y = 0 \quad \tau_y = 0$$

$$p_z = 0(**) \quad \tau_z = 0$$

(**) Aunque $p_z = 0$ existe una velocidad en un sistema absoluto según esa dirección.

Figura 1. Ejemplo de dos tareas con sus restricciones naturales y artificiales.

Las restricciones debidas a la geometría de los cuerpos y a sus ligaduras se denominan «restricciones naturales». Cuando existe impedimento físico para realizar un desplazamiento o rotación en una dirección se dice que hay una restricción de posición; por el contrario, cuando no aparecen fuerzas de reacción, porque el movimiento es absolutamente libre, se dice que existe una restricción de fuerza. Las restricciones naturales indican sobre qué direcciones del marco de acomodación debe primar un control de posición o un control de fuerza (Mason 1979; Lee y Huang 1985). Así, una restricción natural de posición implica control de fuerza y una restricción de fuerza, control de posición. Se establece de esta forma un conjunto de variables a controlar, complementarias a las restricciones naturales, que pueden considerarse como «restricciones artificiales», ya que fijan una posición o una fuerza, que físicamente podría variar, en determinados valores según el objetivo de la tarea.

El marco de acomodación al que están referidas las restricciones depende de la geometría de los objetos y de la tarea a cumplir y no de la configuración del robot, de sus articulaciones o de su elemento terminal. No obstante, y por comodidad de trabajo, resulta interesante tratar de hacerlo coincidir con un sistema de coordenadas absoluto o con uno ligado a la pinza del robot.

En la figura 1 se muestran ejemplos de dos tareas y sus respectivas restricciones en un marco de acomodación apropiado. Es de hacer notar que, en el caso a), el marco de acomodación permanece fijo respecto a un sistema de coordenadas absoluto; en cambio, en el caso b), es fijo respecto a la manivela y variable respecto a un sistema absoluto.

2. ACOMODACION PASIVA Y ACOMODACION ACTIVA

Acomodación pasiva.

La acomodación se denomina pasiva cuando la modificación de la trayec-

* Por simplicidad, a lo largo de todo este artículo, «posición» representa «posición y orientación» y «fuerza» implica «fuerza y par».

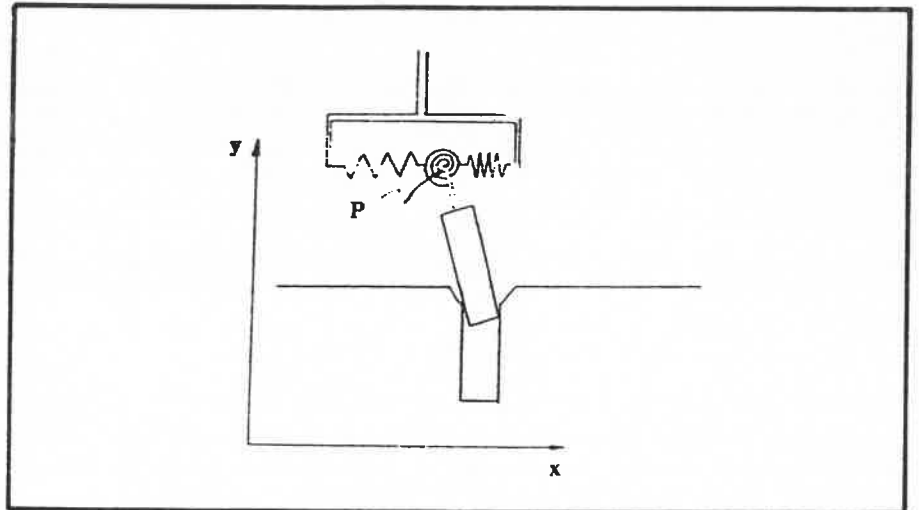


Figura 2. Representación esquemática de un dispositivo de acomodación pasiva.

toria o posición del elemento terminal, o del objeto que sustenta, se produce gracias a la capacidad de deformación frente a esfuerzos de un dispositivo pasivo con cierta elasticidad. Estos dispositivos pasivos (generalmente de tipo mecánico como, por ejemplo, muelles) se deforman ante la presencia de fuerzas, almacenando energía que disipan al volver a su posición original. No exigen, por tanto, realizar una medición explícita de las fuerzas de reacción a fin de que el sistema de control actúe en consecuencia, tratando de llevarlas a valores deseados.

En principio, se podría considerar como acomodación pasiva la deformación propia del brazo del robot sometido a esfuerzos; obviamente en la práctica este efecto no es siempre deseable y, en todo caso, resultaría insuficiente, por lo que la acomodación pasiva se realiza mediante elementos especiales, montados en la muñeca del robot, que por sus características constructivas pueden deformarse en algunas direcciones, con valores de elasticidad prefijados. Tanto las direcciones de deformación como los valores de elasticidad son por lo general fijos para cada dispositivo, por lo que éste debe ser especialmente seleccionado de acuerdo con la tarea a realizar.

En la figura 2 se muestra esquemáticamente el funcionamiento típico de un dispositivo de acomodación pasiva. Dos resortes lineales y uno de torsión, de elasticidad apropiada, permiten el desplazamiento según el eje x

del punto P y la rotación del vástago alrededor de dicho punto. Este sencillo sistema facilita la inserción del cilindro sin riesgo de atascamiento ante un error de posición inicial inferior a un valor predeterminado.

Un concepto de gran importancia es el de «centro de acomodación», que se define como el punto sobre el que se centran las acciones correctivas del sistema. Dicho de otra forma, una fuerza aplicada sobre el centro de acomodación produce únicamente desplazamiento en la dirección de aquélla y, análogamente, un par sobre un eje que pasa por dicho centro produce una rotación pura alrededor de dicho eje. La figura 3 ilustra el concepto. En el ejemplo mostrado en la figura 2, el centro de acomodación es el punto P. Entre los varios dispositivos para acomodación pasiva desarrollados se puede citar como ejemplo el RCC (Remote Center Compliance) mostrado en la figura 4. (Watson 1976; Nevins y Whitney 1980).

En el RCC las barras verticales (V) dan lugar a un centro de acomodación virtual en el infinito, por lo que cualquier fuerza lateral producirá únicamente desplazamiento lateral (equivalente a una rotación respecto a un punto en el infinito). Las barras oblicuas (O) dan como resultado un centro de acomodación en el extremo del vástago y, en consecuencia, cuando se aplique un momento en ese punto, existirá movimiento puro de rotación.

Este dispositivo permite realizar tareas de inserción con hasta una Relación

Control de robots con acomodación activa

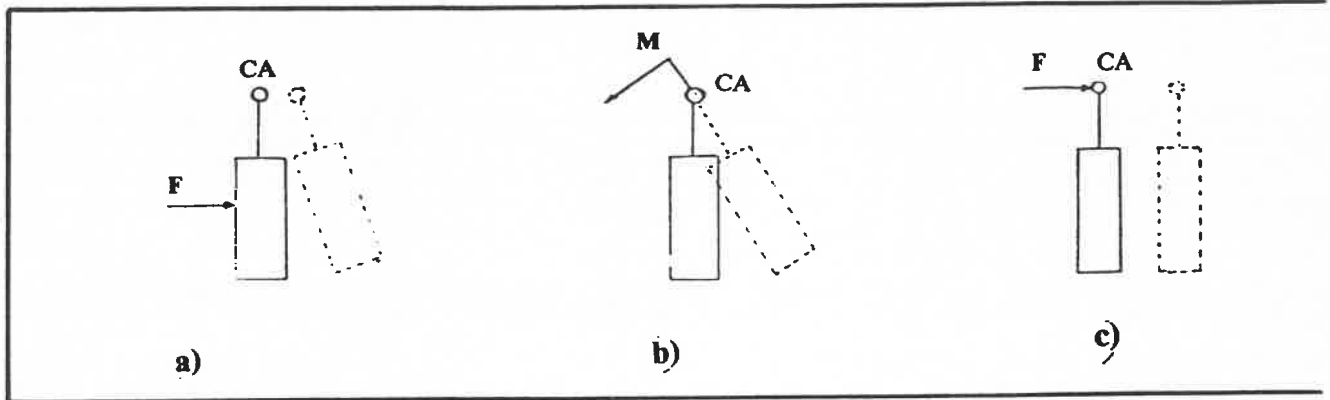


Figura 3. Ilustración del concepto de centro de acomodación (CA):

- a) Fuerza aplicada fuera del CA.
- b) Momento aplicado en el CA.
- c) Fuerza aplicada en el CA.

de Tolerancia (Clearance Ratio)(*) de 0.003 y un error de posicionamiento inicial de hasta 1 mm y unos pocos grados de desviación angular (Whitney 1982). El error inicial admisible para este dispositivo fue mayor que el que cabía esperar para dispositivos de acomodación pasiva.

La acomodación pasiva presenta algunas características favorables como son:

- No intervención del sistema de control en la acomodación, lo que da lugar a una mayor simplicidad
- Respuesta continua e inmediata en los movimientos de acomodación
- Dispositivos de relativa sencillez y simplicidad
- No exigencia de sensores especiales de fuerza

y como desventajas:

- Posibilidad de bloqueo durante la inserción
- Elevada dependencia de las características geométricas y físicas de los objetos que se manejan
- Escasa universalidad de cada dispositivo
- Poca versatilidad del sistema

Acomodación activa.

Se dice que la acomodación es activa cuando se realiza la medición explícita de los esfuerzos y, en función de ellos, se controlan los movimientos finos necesarios para cumplir correctamente una tarea. La gran ventaja de la acomodación activa sobre la pasiva es

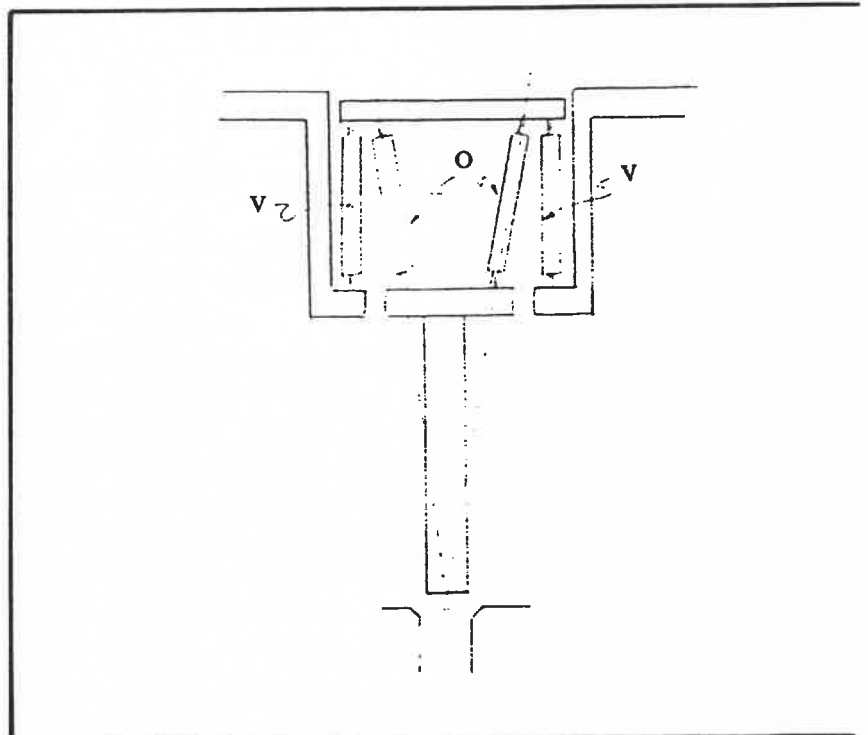


Figura 4. Dispositivo RCC (Remote Center Compliance).

la posibilidad de variar fácilmente la elasticidad del sistema para adecuarse a distintas tareas o aún, a distintas etapas de una misma tarea.

Existen dispositivos especiales para acomodación activa que se montan en la muñeca del robot y tienen incorporados los sensores de fuerza y los servomotores necesarios para realizar los movimientos de corrección de posición. Sin embargo, la tendencia actual es hacia la eliminación de todo actuador adicional de forma que la tarea de acomodación sea llevada a cabo por el mismo robot. Esto trae aparejada la utilización de estrategias de control del robot capaces de mandar

los movimientos para realizar la acomodación. Este último aspecto es, a su vez, el núcleo de todo sistema de acomodación activa y será tratado en un cierto detalle en el apartado siguiente. La medición de los esfuerzos, o fuerzas de reacción, que aparecen en determinada operación del robot puede realizarse básicamente mediante tres técnicas que difieren esencialmente en la ubicación de los sensores (Shimano y Roth 1983):

a) *Medición de esfuerzos en las articulaciones del robot.* Se realiza generalmente de forma indirecta mediante la medición de la corriente que circula por cada uno de los motores.

(*) La Relación de Tolerancia (RT) se define como:
 $RT = (\text{Diámetro agujero} - \text{Diámetro cilindro}) / \text{Diámetro agujero}$

es proporcional al par que estos producen y relativamente fácil de medir. Este método tiene la ventaja de que no sólo se detectan las fuerzas sobre el elemento terminal sino también las ejercidas sobre cualquier parte del brazo, lo que es de utilidad cuando algún obstáculo no previsto se interpone en la trayectoria del robot. El conocer el par en las articulaciones permite también determinar, para cada configuración, la carga gravitacional debida a cada elemento del brazo, su inercia y las fricciones aparentes. Con esta información se puede luego corregir las corrientes de los motores para que el elemento terminal del robot ejerza las fuerzas y momentos deseados.

Una desventaja importante de la medición de esfuerzos en las articulaciones es que la exactitud de las medidas queda limitada por la precisión con que se estimen los coeficientes dinámicos del robot. La imprecisión en la predicción de los coeficientes dinámicos de fricción y de amortiguamiento de las articulaciones puede llevar a la insensibilidad frente a pequeñas variaciones de los esfuerzos en el elemento terminal. Por ejemplo, para el brazo de Stanford, se determinó de forma experimental que, con este método, sólo se podían detectar de forma fiable fuerzas a partir de 4 N., en cualquier configuración (Shimano y Roth 1983). Este valor es suficiente en muchos casos, pero tareas delicadas requieren mucha mayor precisión. Otra gran desventaja de este método es el tiempo de cálculo requerido para convertir los valores de esfuerzo en las articulaciones a valores de fuerza y par en el elemento terminal. En un brazo de seis grados de libertad esta transformación implica resolver un sistema de seis ecuaciones con seis incógnitas (resolver el Jacobiano) cuyos coeficientes dependen además de la configuración del brazo.

b) *Medición en una plataforma soporte.* Consiste en medir los esfuerzos en una plataforma especial en la que está rígidamente sujeta una de las piezas o partes que interactúan. Por ejemplo, si se realiza la inserción de un cilindro en un agujero de otra pieza y esta última se fija en una plataforma adecuada, pueden medirse en ella las fuerzas que aparecen durante la inserción. Los resultados obtenidos

son aceptables en cuanto a precisión y sensibilidad. Sin embargo, la escasa o nula universalidad del método restringe notablemente su aplicación. Es de notar que, en general, se requiere una plataforma especial para cada tipo de pieza a manipular, y aún así, en muchos casos no es posible fijar cómodamente la pieza a ella.

c) *Medición de esfuerzos en la muñeca o la pinza.* Una manera de eliminar o, por lo menos, reducir los efectos estáticos y dinámicos del brazo en la medición de los esfuerzos es colocar los sensores cerca del elemento terminal, por ejemplo en la muñeca o, incluso, en la pinza misma. No cabe duda de que la colocación de los sensores en los dedos de la pinza elimina casi totalmente los efectos de la estructura del brazo, y permite incluso utilizar sensores mixtos de tacto y fuerza. No obstante, debido a las fuertes presiones que requieren algunas pinzas para realizar la sujeción, estos dispositivos pueden presentar problemas de ruido cuando la medición se realiza mientras se mantiene sujeta la pieza. Una gran parte de los dispositivos de medición de fuerza están diseñados para ser colocados en la muñeca del robot, siguiendo la tendencia actual. Tres son las principales ventajas de esta elección. En primer lugar, la ya mencionada de evitar en gran medida los efectos de fricción e inercia del brazo; en segundo, la transformación de la lectura del sensor a fuerzas/par en la pieza depende sólo de la construcción y geometría del dispositivo sensor, que puede ser diseñado para una fácil conversión; y finalmente, su funcionamiento es independiente del tipo de pinza que se use, siendo, por tanto, mucho más versátil. La precisión y sensibilidad de los dispositivos para medición de esfuerzos en la muñeca son satisfactorias, y alcanzan fácilmente el orden de unas centésimas de Newton. Sin embargo, la reducida banda pasante de la estructura del robot hace que los sistemas de control de fuerza que utilizan este tipo de sensores, presenten una pobre respuesta temporal. Shimano y Roth (1983) analizan las características a tener en cuenta en el diseño de estos elementos y exponen la configuración básica más común de los mismos.

3. ESTRATEGIAS DE ACOMODACION ACTIVA

Obviamente, la elección de la estrategia a seguir para realizar la acomodación es un aspecto fundamental, ya que su objetivo es lograr un correcto control de posición y fuerza, adecuado a la tarea a cumplir. Para planear una estrategia debe definirse previamente el marco de acomodación. Ya se mencionó anteriormente que dicho marco puede variar durante la tarea respecto de un sistema de coordenadas absoluto, y este hecho debe contemplarse cuidadosamente al realizar el control. Para completar el problema deben considerarse las siguientes variables, referidas a posición y fuerza:

- valores deseados
- valores medidos por los sensores
- errores
- acciones de control
- restricciones existentes

Cada una de ellas requiere un sistema de coordenadas en el que ser expresada. La elección de marcos de referencia apropiados para cada caso, que faciliten las operaciones entre las variables y eviten en lo posible la necesidad de transformaciones de un marco a otro, será una de las premisas a tener en cuenta.

Dos son las estrategias de control principalmente empleadas: realimentación explícita y control híbrido; y cada una de ellas ha sido resuelta según diversos enfoques.

Realimentación explícita.

La acomodación activa por realimentación explícita se basa en establecer una relación lineal entre el error de posición en cada instante y la fuerza ejercida para corregirlo, haciendo actuar cada grado de libertad como un resorte con coeficiente de elasticidad variable según la tarea, o incluso, según la fase de la misma que se está realizando. Así, para un sistema multidimensional se tiene la siguiente expresión, que no es más que una versión matricial de la ley de Hooke:

$$F = K \Delta P$$

donde

F = vector de fuerzas y pares

ΔP = vector de errores de posición y orientación

K = matriz de elasticidad del sistema

Control de robots con acomodación activa

Salisbury (1980) se basa en esta ley para proponer un sistema de control con acomodación activa en un marco de acomodación cartesiano: dado que el vector F se genera realmente a partir de fuerzas aplicadas en cada articulación del brazo, Salisbury se plantea la determinación de una expresión que relacione las fuerzas en las articulaciones con los errores de posición en las mismas, pero de tal manera, que dé lugar al efecto de acomodación deseado sobre el marco de acomodación cartesiano seleccionado.

La expresión matricial de la ley de Hooke en un sistema de coordenadas cartesiano sobre el que se desea realizar la acomodación vendrá dado por:

$$F = K \cdot \Delta P \quad (1)$$

Dado que F y ΔP están expresados en el mismo sistema de coordenadas del marco de acomodación, la matriz de elasticidad K será diagonal, es decir, el desplazamiento o giro en un eje estará relacionado únicamente con la fuerza o el par según dicho eje,

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & k_2 & & & \\ \dots & k_3 & & & \\ & & k_4 & & \\ & & & k_5 & \\ & & & & k_6 \end{bmatrix}$$

donde un valor de k_i grande da preponderancia en el eje i al control de posición, y un valor de k_i pequeño lo da al control de fuerza en ese mismo eje.

El vector ΔP se puede expresar en función de error de posición en las ar-

ticulaciones $\Delta \theta$ mediante el Jacobiano J .

$$\Delta P = J \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

Si se desprecian los efectos dinámicos, el vector T de las fuerzas articulares necesario para producir un vector F en el elemento terminal viene dado por la transformación,

$$T = J^T \cdot F \quad (3)$$

Combinando las expresiones (1), (2) y (3) se obtiene la relación buscada

$$T = J \cdot K \cdot J^T \cdot \Delta \theta = K_e \cdot \Delta \theta$$

donde el término $J \cdot K \cdot J^T = K_e$ se denomina matriz de elasticidad en las articulaciones.

Debe destacarse el hecho de que el Jacobiano puede calcularse para cualquier sistema de coordenadas lo que permite ubicar el centro y marco de acomodación en cualquier posición y orientación respecto del elemento terminal. Por otra parte, el cálculo de K_e no exige que J sea una matriz cuadrada lo que permite aplicar este método a manipuladores con más de seis grados de libertad.

En la figura 5 se representa esquemáticamente en un diagrama de bloques el método propuesto (los subíndices d y r indican valor deseado y valor real, respectivamente).

Este método ha sido implementado por Salisbury teniendo además en cuenta, para realizar el control, las cargas gravitacionales y las fricciones en las articulaciones. Para la medición de esfuerzos utiliza un sensor en

la muñeca, si bien sugiere que pueden mejorar las prestaciones combinándolo adecuadamente con sensores en las articulaciones. Para realizar la programación de las operaciones de acomodación desde un lenguaje de bajo nivel se han agregado nuevos comandos al lenguaje AL, tales como WHIT STIFFNESS ($K_x, K_y, K_z, G_x, G_y, G_z$).

WHIT FORCE (coordenada) = v
WHIT TORQUE (coordenada) = τ
que permiten variar fácilmente elasticidades, fuerzas y pares deseados.

Control Híbrido.

Esta estrategia consiste en control de posición pura en determinadas direcciones y fuerza pura en las restantes. Bajo este criterio la elección de las direcciones a controlar en posición y fuerza está íntimamente ligado a las restricciones naturales que aparecen en la tarea, y, por lo tanto, se sugiere usar como marco de acomodación el mismo que surge al expresar las restricciones. El problema radica que si el marco de acomodación varía durante la tarea, su continua actualización en el sistema de control requiere excesivo volumen de cálculo. Más adelante se comentan algunas propuestas que intentan paliar este inconveniente. El control híbrido implica un análisis previo para la determinación del marco de acomodación en función de la tarea y del mundo físico en el que ésta se realice. Si bien existen diversos estudios tendientes a lograr una determinación automática del marco de acomodación (Mason 19

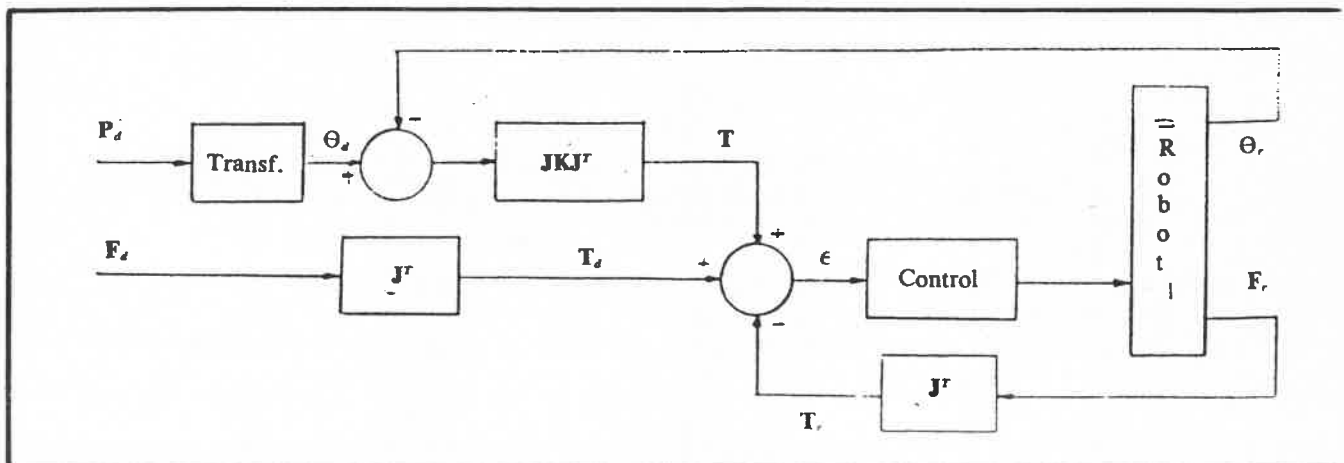


Figura 5. Esquema de bloques del control por realimentación explícita (Salisbury).

1981; Lee y Huang 1985; Lozano-Pérez, Mason y Taylor 1983), éste es un problema aún no totalmente resuelto. A continuación se exponen brevemente tres diferentes posibilidades de realizar el control híbrido.

a) **Articulación libre** (Paul y Shimano 1976; Paul 1981). Este método consiste en realizar la acomodación en cada grado de libertad del marco de acomodación cartesiano mediante el control apropiado de una sola articulación del robot asociada a dicho grado de libertad.

Determinada la tarea y el marco de acomodación respectivo en coordenadas cartesianas (C), se busca la articulación del robot cuyo movimiento aproxime mejor el desplazamiento de la pinza según una coordenada de (C) en la que se quiere controlar fuerza. La operación se repite con las restantes coordenadas sobre las que se desea controlar fuerza, asociándose a cada una de ellas una articulación en particular. Luego, las articulaciones asociadas se controlan en fuerza y las restantes en posición.

En general, cada articulación del robot no producirá movimientos según un único grado de libertad de (C), por lo que la correspondencia de efectos no es perfecta y cada vez que en una articulación se produzca un movimiento al controlar la fuerza según una coordenada de (C), se producirá un error de posición en algunas de las restantes. Estos errores se detectarán e intentarán corregir con la próxima acción de control mediante las articulaciones controladas en posición.

Para realizar la selección de la articulación que mejor produce acomodación según una coordenada de (C) se procede de la siguiente manera: primero se determinan las fuerzas necesarias en cada articulación (τ_i) para realizar una fuerza (F_i) según la coordenada deseada de (C), luego se calculan mediante la inversa del Jacobiano los cambios de posición en las articulaciones ($d\theta_i$) para un cambio unitario según dicha coordenada de (C). Con estos valores se puede calcular para cada articulación del brazo el trabajo virtual necesario para una variación unitaria de posición en la dirección de acomodación,

$$W_i = \tau_i \cdot d\theta_i$$

este valor, normalizado respecto de la inercia efectiva de cada articulación I_i , suministra la figura de mérito m_i ,

$$m_i = W_i/I_i = \tau_i \cdot d\theta_i/I_i$$

La articulación con mayor figura de mérito será la más idónea para realizar la acomodación en la coordenada de (C) elegida, y, por tanto, será controlada en fuerza.

Aunque este método ha sido utilizado con resultados aceptables, presenta algunas desventajas que lo van posponiendo ante otras soluciones. La principal es que desde el momento en que el movimiento de una articulación no se corresponda exactamente con el deseado en (C), el control introducirá errores apreciables, aunque estos sean posteriormente compensados. Por otra parte, al moverse el manipulador va cambiando su configuración cinemática y, por tanto, las asociaciones

articulación-grado de libertad en (C) deben ir variando. Esto implica que las figuras de mérito y la selección de articulaciones deben realizarse periódicamente. Lo mismo ocurre cuando el marco de acomodación es el que varía. Estas desventajas limitan la utilidad del método a algunos casos particulares.

b) **Control híbrido cartesiano**. Raibert y Craig (1982) proponen otro enfoque del control híbrido que pretende obviar las imprecisiones propias del método anterior. La propuesta se basa en realizar el control directamente sobre el sistema de coordenadas cartesiano (C) en el que se desea la acomodación, haciendo que todas las articulaciones del robot contribuyan tanto al control de fuerza como al de posición.

En la figura 6 se muestra un diagrama de bloques esquemático del sistema de control propuesto.

La matriz de selección S es diagonal y se forma a partir de un vector de selección de acomodación, cuyos componentes valen «1» para los grados de libertad de (C) que se controlan en fuerza y «0» para los controlados en posición. Por ejemplo, si se controla desplazamiento y rotación según el eje z y fuerza y par según x e y, el vector de selección será $s = (110110)^T$ y la matriz de selección

$$S = I \cdot s = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ & & & 1 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \end{matrix}$$

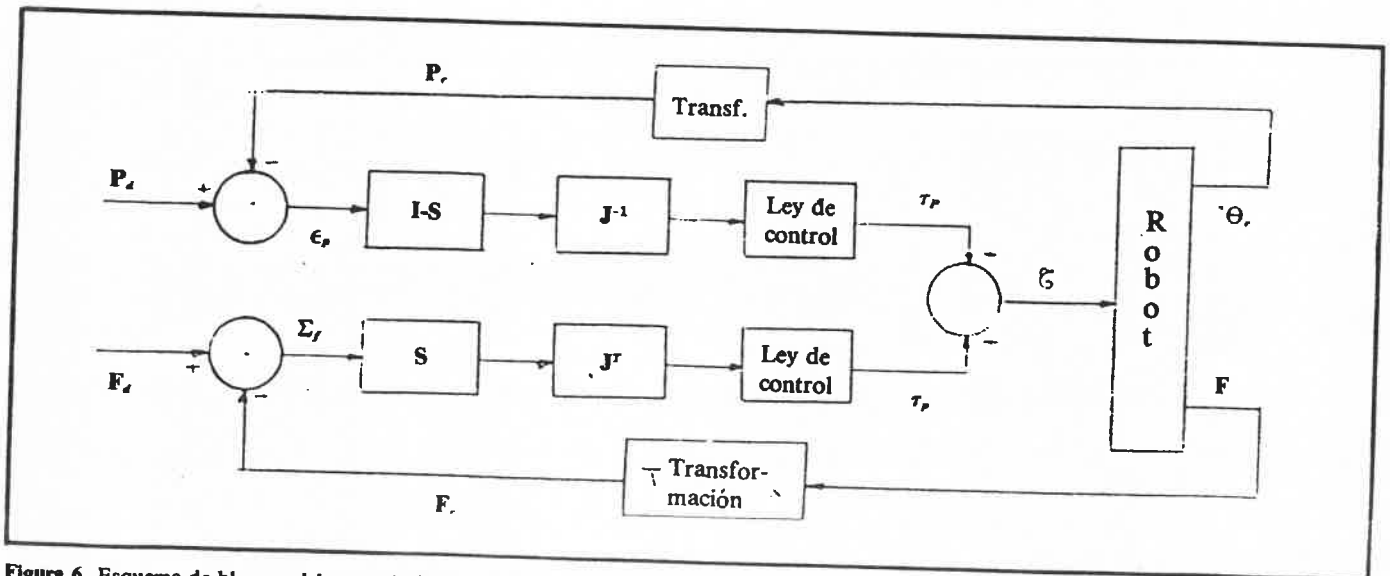


Figura 6. Esquema de bloques del control híbrido (Raibert-Craig).

Control de robots con acomodación activa

Esta matriz tiene como finalidad que en el control se tenga en cuenta o bien el error de posición o bien el de fuerza de cada grado de libertad del marco de acomodación cartesiano. Es decir, la señal de control para cada servo del robot se obtiene como la suma de la señal τ_p debida al lazo del control de posición (con los errores seleccionados por (I-S)) y de la señal τ_f generada por el bucle de control de fuerza (con los errores seleccionados por S). Algebraicamente, puede expresarse, para la articulación i :

$$\begin{aligned} \tau_i &= \\ &= \sum_{j=1}^N [\varphi_{ij} s_j \epsilon_{fj}] + \psi_{ij} [(1 - s_j) \epsilon_{pj}] = \\ &= \tau_{fi} + \tau_{pi} \end{aligned}$$

donde:

τ_i = fuerza a producir por el actuador.

ϵ_{fj} = error de fuerza en el j -ésimo grado de libertad del marco cartesiano.

ϵ_{pj} = error de posición en el j -ésimo grado de libertad del marco cartesiano.

φ_{ij} y ψ_{ij} = funciones de transferencia entre el error j y fuerza i (comprenden transformación de coordenadas y ley de control).

s_j = componente j del vector de selección.

Es de notar que para calcular los errores en el marco de acomodación cartesiano (C), es necesario realizar una transformación de los valores sumi-

nistrados por los sensores de fuerza y posición. Una vez calculados los errores en (C) y realizada su selección mediante S para el lazo de fuerza y (I-S) para el lazo de posición, deben transformarse a errores a nivel de las articulaciones para realizar el control. Este conjunto de transformaciones cuyos operadores varían en función de la configuración del brazo, requiere un trabajo computacional elevado y constituye la gran limitación del método.

La verificación experimental de este método ha sido realizada con un manipulador de dos grados de libertad. La prueba consistía en mantener el elemento terminal del robot apoyado en el borde de una mesa con desplazamiento mandado por control numérico (Fig. 7).

Se pretendía mantener una cierta presión sobre la mesa (control de fuerza según C_x) con una posición determinada (control de posición en C_y). La medición de esfuerzos se realizaba en la muñeca del robot. Los resultados prácticos obtenidos fueron bastante cercanos a los deseados ante distintos requerimientos de fuerza y posición (Raibert y Craig 1981). Como prueba en una tarea real, este tipo de control se ha aplicado a un robot de tres grados de libertad (x y ϕ) para realizar tareas de inserción cilíndrica operando sobre un plano. Este método se presenta muy adecuado para tareas de acomodación en un sistema de coor-

denadas cartesianas. El elevado coste computacional es hasta ahora su mayor limitación.

c) **Control híbrido modificado** (Zhang y Paul 1985). Se basa en los planteamientos de Salisbury (realimentación explícita) y de Raibert-Craig, procurando aprovechar las ventajas de ambos y evitando los inconvenientes de cada uno de ellos.

Al igual que en el método de Salisbury, se determina el error de posición en las articulaciones y a partir de él, mediante el Jacobiano J, se calcula el error en el marco de acomodación cartesiano. Sin embargo, en vez de utilizar una matriz de elasticidad K (Salisbury) se aplica una matriz S de selección (Raibert-Craig), que mantiene sólo los errores de las coordenadas en las que se desea controlar posición. Estos errores se transforman nuevamente a nivel de articulaciones mediante el Jacobiano inverso J^{-1} y se realiza el control necesario para anularlos. El vector de errores de posición que afecta al controlador es entonces

$$\Delta\theta_c = J^{-1} S J \Delta\theta = S\Theta$$

donde $S\Theta = J^{-1} S J$ se denomina matriz de acomodación de las articulaciones. El Jacobiano puede referirse a un marco de acomodación remota que no tiene que coincidir necesariamente con el de la pinza.

Este método permite un control de posición más efectivo que el de Salisbury y con menos coste computacional que el de Raibert-Craig. La implementación ha sido realizada con control de posición en anillo cerrado y control de fuerza en anillo abierto. La figura 8 permite comparar el esquema de bloques simplificado de este método con los correspondientes a los demás métodos en los que está basado.

4. EJEMPLO DE APLICACION

A fin de aclarar los conceptos expuestos, se presenta a continuación un ejemplo concreto de utilización de la acomodación activa para llevar a cabo una tarea.

Supongamos que un robot de seis grados de libertad debe desplazar un patín sobre una guía rectilínea (Fig. 9). Tres problemas perfectamente definidos pueden suscitarse al realizar esta tarea:

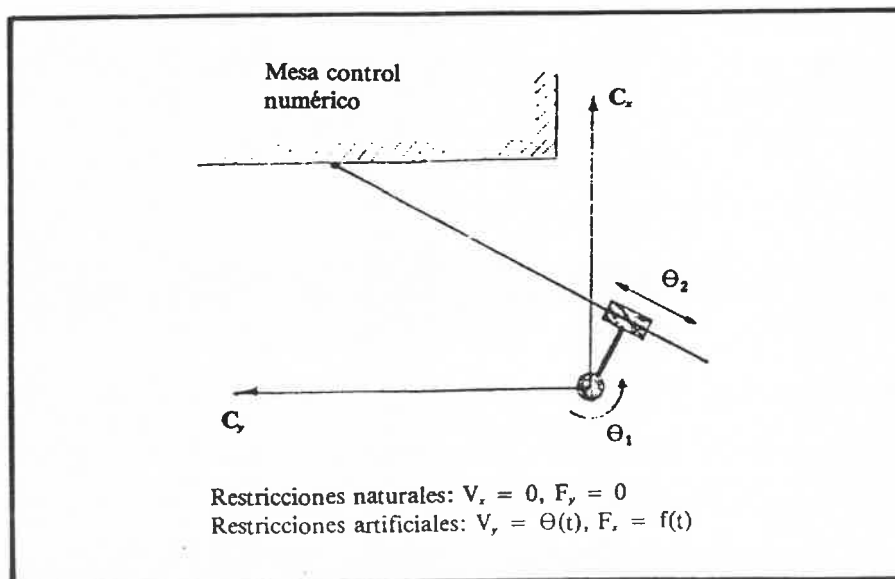


Figura 7. Realización experimental del control híbrido de Raibert-Craig.

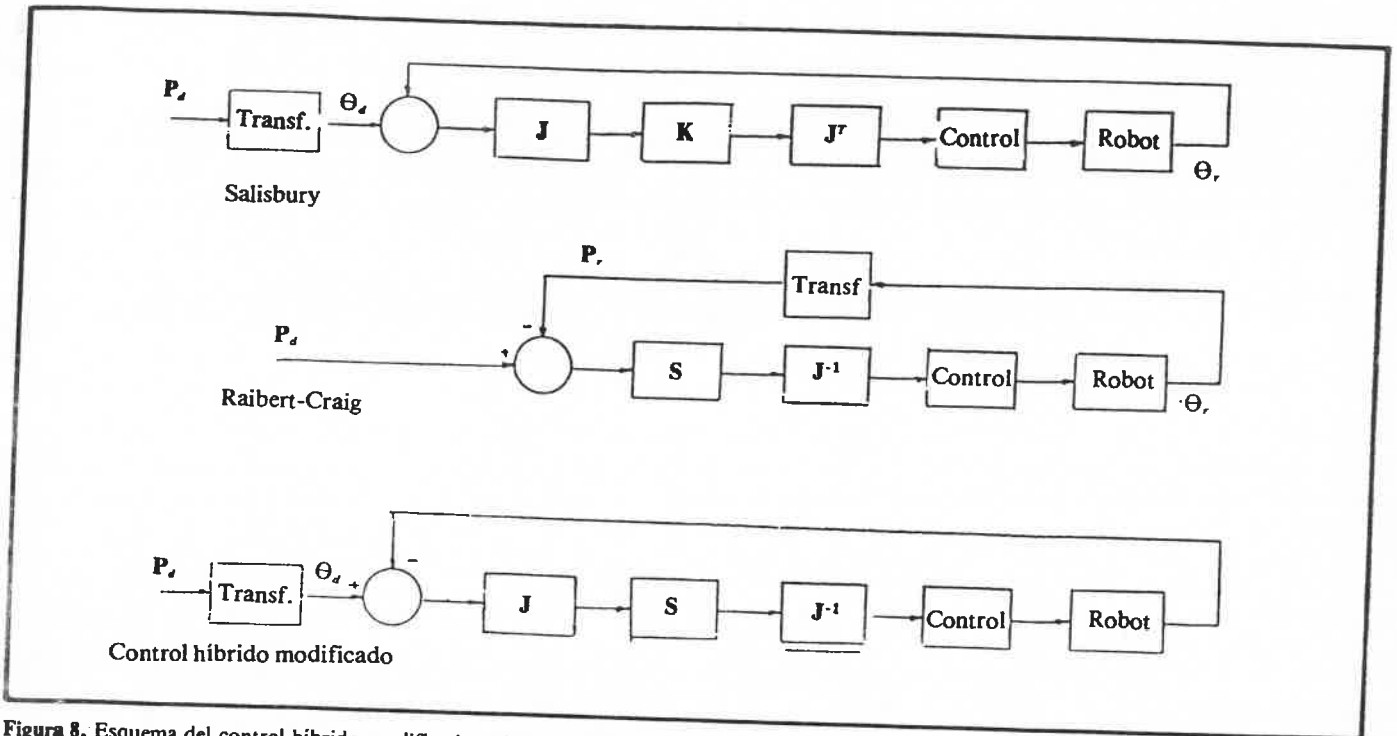


Figura 8. Esquema del control híbrido modificado y de los modelos en los que se basa.

- 1.— Que la guía no sea perfectamente recta o tenga en alguna parte una deformación local (por falta de rigidez del material, por ejemplo).
 - 2.— Que no se conozca con suficiente precisión su posición (por que sea móvil y no haya alcanzado su posición correcta).
 - 3.— Que la precisión del robot sea insuficiente para seguir la guía.
- Los tres casos pueden llevar en una situación límite al atascamiento del sistema guía-patín-robot y todos ellos pueden ser superados mediante acomodación activa.

Si se considera fija la guía en un sistema de coordenadas absolutas, el análisis de las ligaduras entre las partes permite concluir que la tarea tiene un solo grado de libertad. Entonces, a partir de los datos sobre las características geométricas de los cuerpos y sobre sus ligaduras, se determina el marco de acomodación, expresándose en él las restricciones naturales y artificiales. El marco adecuado resultante es el mostrado en la figura 9 y las restricciones resultan ser:
 Restricciones naturales:
 $V_x = 0 \quad W_x = 0$

$$V_y = 0 \quad W_y = 0$$

$$f_x = 0 \quad W_z = 0$$

Restricciones artificiales:

$$f_x = 0 \quad \tau_x = 0$$

$$f_y = 0 \quad \tau_y = 0$$

$$V_z = v(t) \quad \tau_z = 0$$

De ellas se deducen las direcciones sobre las que se ha de realizar control de posición (traslación según z) o control de fuerza (demás grados de libertad).

Por tanto, si se opta por un control híbrido, el vector de selección sería:
 $s = (110111)$

Si el control deseado fuese de realimentación explícita la matriz de elasticidad en el marco de acomodación sería:

$$K = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & k_y & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & K_z & 0 & \dots \\ \dots & 0 & \alpha_x & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \alpha_y & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \alpha_z \end{bmatrix}$$

con $k_x, k_y, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ valores pequeños y K_z , valor elevado.

Estos parámetros pueden ser explicitados desde un lenguaje de control con sentencias especiales (Lozano-Pérez 1983; Salisbury 1980), como por ejemplo:

```
WITH FORCE X = 0, Y = 0
WITH TORQUE
X = 0, Y = 0, Z = 0
MOVE Z
```

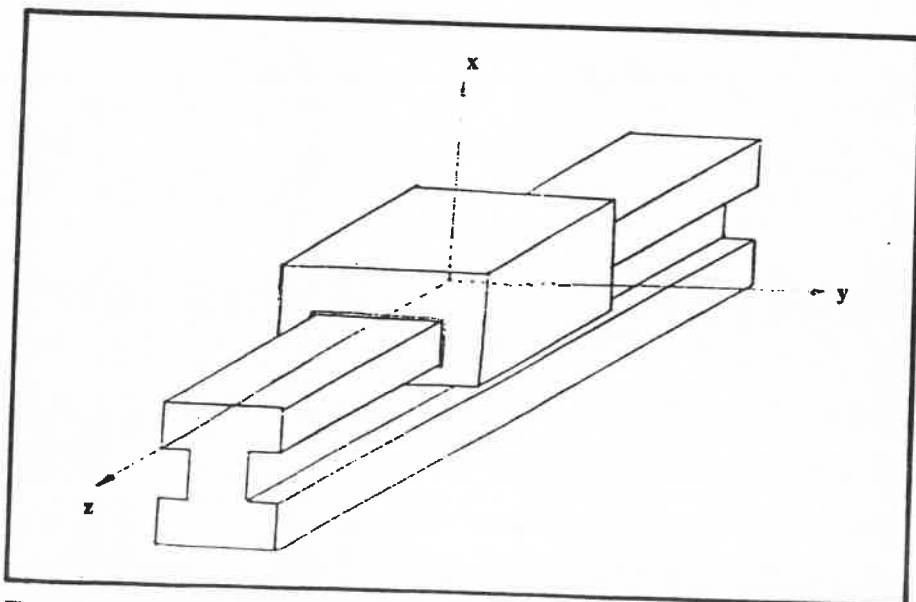


Figura 9. Sistema patín-guía y marco de acomodación adecuado

Control de robots con acomodación activa

para el caso de control híbrido, o:
WITH STIFFNESS ($k_x, k_y, K_z, \alpha_x,$
 α_y, α_z)

MOVE Z

si se tratase de realimentación explícita.

Una condición adicional sería que el patín debiera ser arrastrado hasta entrar en contacto con un tope o engancharse en él. En tal caso, cabe pensar en un control conjunto de posición y fuerza sobre una misma coordenada, de manera que el patín se desplace controlado en posición hasta que aparezca una fuerza de reacción determinada según z. Se evita así ejercer fuerzas de intensidad no controlada, asegurándose simultáneamente una presión que garantice el contacto o enganche en el tope. Podría indicarse en un lenguaje específico:

UNTIL FORCE (Z = Z1)

MOVE Z

Otra variante del mismo ejemplo sería requerir que el patín se desplazase haciendo una cierta presión sobre la guía. En tal caso, la restricción artificial de fuerza según x no sería nula sino que tendría un valor $x1$ ($f_x = x1$). Este ejemplo muestra que las restricciones artificiales, si bien quedan formalmente definidas por la geometría de los cuerpos, pueden ser cuantitativamente determinadas por el tipo de tarea que se desee realizar. Si el patín pudiese girar libremente alrededor de la guía tendríamos un caso con dos grados de libertad (Fig. 10).

Las restricciones naturales serían:

$$V_x = 0 \quad W_x = 0$$

$$V_y = 0 \quad W_y = 0$$

$$f_z = 0 \quad \tau_z = 0$$

pero las artificiales podrían tomar distintos valores, según la tarea deseada.

Si no quisiese que el patín girase serían:

$$f_x = 0 \quad \tau_x = 0$$

$$f_y = 0 \quad \tau_y = 0$$

$$V_z = v \quad W_z = 0$$

y en términos más generales es

$$V_x = v(t) \text{ y } W_z = W(t)$$

5. CONCLUSIONES Y TENDENCIAS

La acomodación es un aspecto de gran importancia en la robotización de tareas como las de montaje que implican interacción entre objetos. El montaje representa un elevado porcentaje del tiempo y coste de elaboración de muchos productos, y su automatización de manera eficiente depende en gran medida de la adecuada utilización de la acomodación. Salvo algunos casos de tareas muy específicas, la acomodación activa se impone sobre la pasiva por su mayor versatilidad para realizar diferentes tareas, precepto fundamental en la producción flexible.

Las estrategias de control expuestas presentan diferentes ventajas e inconvenientes y su elección depende en alguna medida del tipo de tarea a realizar. El control con realimentación explícita (Salisbury 1980) basa su acción en la ley de Hooke aplicada a cada grado de libertad al hacer que las fuerzas ejercidas sean proporcionales al error de posición existente. Dentro de las estrategias de control híbrido, el método de articulaciones libres (Paul y Shimano 1976) ha sido el primero desarrollado, pero salvo en casos particulares de elevada coincidencia de movimientos articulación-mar-

co de acomodación, genera imprecisiones inherentes a su propio principio de funcionamiento. El control híbrido de Raibert-Craig (1981) es más satisfactorio, pero tiene una fuerte limitación en el volumen de cálculo necesario, aunque la disponibilidad de procesadores potentes puede minimizar este problema en un futuro próximo. El control híbrido modificado (Zhang y Paul 1985) pretende reducir el volumen de cálculo aprovechando las ventajas de los otros dos métodos. Una estrategia en la que están trabajando los autores es un control mixto de fuerza y posición. En esta estrategia el error a anular se plantea como una función del error de posicionamiento y del error de fuerza. La elección de dicha función constituye el punto clave de esta estrategia, que puede ser una interesante alternativa a las anteriormente expuestas. Finalmente, si se considera la acomodación activa como una prestación más de un sistema automatizado conducido desde alto nivel, se puede pensar en la construcción de un módulo que a partir de las especificaciones de la tarea (objetivo, entorno, situación real) determine automáticamente características tales como tipo de estrategia a usar, marco de acomodación apropiado, restricciones naturales, restricciones artificiales adecuadas y hasta los parámetros de la matriz de elasticidad o de selección según corresponda.

BIBLIOGRAFIA

- GROOME, R.C., *Force Feedback Steering of a Teleoperator System*. M.S. Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 1972.
- HANAFUSA, H., ASADA, H. «Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers», Proceedings of the 7th International Symposium on Industrial Robotics, Tokyo, October 1977, pp. 363-368.
- HANAFUSA, H., ASADA, H. «A Robot Hand with Elastic Fingers and Its Application to Assembly Process», IFAC Symposium on Information and Control Problems in Manufacturing Technology, Tokyo, 1977, pp. 127-133.

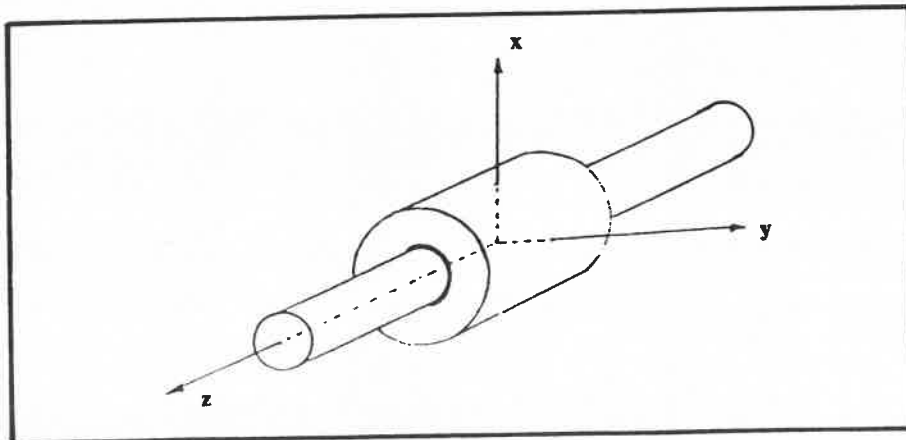
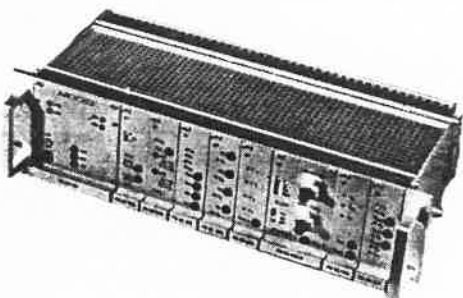


Figura 10. Sistema patín-guía con dos grados de libertad

- INOUE, H., «Computer controlled bilateral manipulator», *Bulletin of the JSME* 14, 69 (1971), pp. 199-207.
- LEE, C.S., HUANG, D., «A Geometric Approach to Deriving Position/Force Trayectory in Fine Motions», IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, March 1985, pp. 691-697.
- LOZANO-PEREZ, T., «Robot Programing», Proceeding of the *IEEE*, Vol. 71, No. 7, July 1983, pp. 821-844.
- LOZANO-PEREZ, T., MASON, M.T., TAYLOR, R.H., «Automatic Synthesis of Fine Motions Strategies for Robots», *MIT Artificial Intelligence, A.I. Memo 759*, December 1983.
- MASON, M.T., «Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators», *MIT Artificial Intelligence Lab.*, TR 515, April 1979.
- MASON, M.T., «Compliance», in *Robot Motion: Planing and Control*, M., Brady et al., Eds. Cambridge, MA: MIT Press, 1983.
- NEVINS, J, WHITNEY, D.E., «Assembly Research», *Automática, Vol. 16*, 1980, pp. 595-613.
- PAUL, R.P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programing and Control*, Cambridge, MA: MIT Press, 1981.
- PAUL, R.P., SHIMANO, B., «Compliance and Control», Proceedings of the 1976 Joint Automatic Control Conference, pp. 694-699.
- RAIBERT M.H., CRAIG J.J., «Híbrid Position/Force Control of Manipulators», Transactions of ASME, *Journal of Dinamic Systems, Measurements and Control*, Vol. 102, June 1981, pp. 126-133.
- SALISBURY, J.K., «Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates», Proceedings of the 19 th IEEE Conference on Decision and Control, 1980, pp. 95-100.
- SHIMANO, B., ROTH, B., «On Force Sensing Information and Its Use in Controlling Manipulators», Proceedings of the Eight Industrial Symposium on Industrial Robots, Washington D.C., pp. 119-126.
- SILVER, D., «The little robot system», *Artificial Intelligence Lab.*, MIT, AIM 273, January 1973.
- WHITNEY, D.E., «Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts.», *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, Vol. 104, March 1982, pp. 65-77.
- ZHANG, H., PAUL, R.P., «Híbrid Control of Robot Manipulator», IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, March 1985, pp. 602-607.

ELECTRONICA...

Un sistema modular

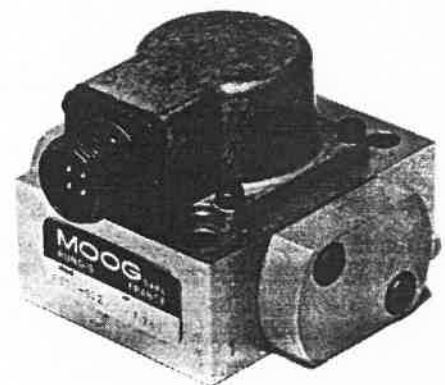


La solución para su automatismo

- regulación de velocidades
- regulación de fuerzas o presiones
- regulación de posiciones

SERVOVALVULA...

Una gama completa



MOOG

MOOG, S.A.R.L. Sucursal en España
 C/ Jesús Aprendiz, 21, bajo - 28007 MADRID
 Télex: 44789 MOOG-E. Tel. (91) 252 67 01/02