



# Control de fuerza en robótica

**Raúl Suárez Feijó**

Raúl Suárez Feijó pertenece al Instituto de Cibernética (UPC - CSIC)

## Sumario

1. Introducción
2. Aspectos relacionados con el control de fuerza
3. Comportamientos típicos deseados en control de posición y fuerza
4. Criterios para clasificar los esquemas de control de posición y fuerza
  - 4.1. Existencia de realimentación de fuerza.
  - 4.2. Requerimiento de consignas de fuerza por parte de la tarea
  - 4.3. Modo de usar los valores de fuerza medidos
  - 4.4. Influencia relativa de los lazos de realimentación de P y F
  - 4.5. Coordenadas donde se evalúa el error
  - 4.6. Según sobre qué lazo se procesa la señal de fuerza
  - 4.7. Según cuál sea el efecto buscado
5. Esquemas básicos de control de posición - fuerza
  - 5.1. Control implícito de fuerza
  - 5.2. Control explícito de fuerza
  - 5.3. Control híbrido de posición - fuerza
  - 5.4. Control activo de elasticidad en coordenadas cartesianas
  - 5.5. Control de amortiguamiento
  - 5.6. Control de impedancia
6. Ejemplos de tareas resueltas con diferentes controles P / F
  - 6.1. Tarea 1: posicionar un bloque en un rincón de una caja
  - 6.2. Tarea 2: inserción de un vástago en un agujero
7. Conclusiones
8. Referencias

### Palabras clave:

*Robótica  
Control de fuerza  
Acomodación activa*

### Key words:

*Robotics  
Force control  
Active acomodation*

**E**n este artículo se da una visión general del problema de control de fuerza con vistas a la realización de acomodación activa mediante las propias articulaciones del robot. El trabajo incluye ejemplos de aplicación de diferentes esquemas de control para la solución de dos tareas típicas.

**I**n this article a general view of the force control problem to perform robot active compliance is given the work includes examples of different control schemes to solve two typical tasks.

## Control de fuerza en robótica

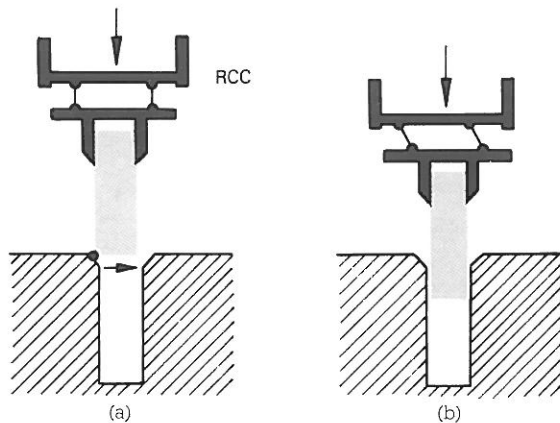


Fig. 1a

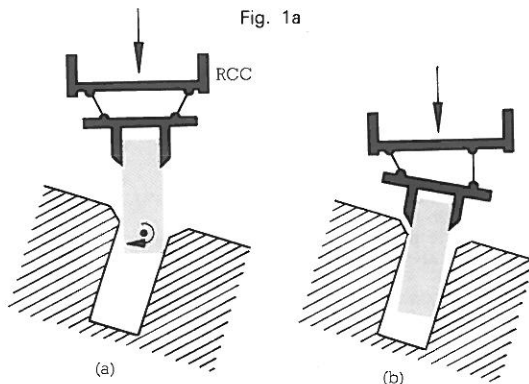


Fig. 1b

Fig. 1. Esquema de un RCC (Remote Center Compliance), dispositivo utilizado para realizar la corrección de la trayectoria predefinida de la garra del robot.

### 1. Introducción

La robotización de gran cantidad de tareas requiere la utilización de robots que tengan altas prestaciones en cuanto a precisión y repetitividad. Tal es el caso de las tareas de montaje y ensamblado de piezas, particularmente aquellas que implican la inserción de una pieza en otra con holguras muy pequeñas.

En estos casos, tanto el coste como la complejidad del sistema se incrementan notablemente si se desea mejorar la precisión y repetitividad del robot, y aun así hay situaciones en las que no se podría garantizar la ejecución de la tarea con éxito, debido a las tolerancias en las dimensiones de los objetos a manipular y a las imprecisiones de su posicionamiento en el entorno de trabajo.

Una forma de atacar este problema es recurrir a dispositivos mecánicos flexibles, que colocados en

la muñeca del robot permiten hacer correcciones de posición del elemento terminal cuando éste se ve sometido a esfuerzo. Este tipo de corrección de la trayectoria predefinida de la garra se denomina *acomodación pasiva*. El dispositivo más típico para su realización es el RCC (*Remote Center Compliance*), mostrado en la figura 1 [Whitney70a]. Este dispositivo define un punto en el espacio, llamado *centro de acomodación*, en el que las fuerzas aplicadas sólo producen desplazamientos y los pares sólo giros en torno a un eje que pasa por dicho punto. La elasticidad con que se desplaza o gira viene determinada por su construcción mecánica y es un parámetro fijo.

Otra forma de realizar la acomodación es mediante dispositivos activos, provistos de sensores y actuadores, que colocados también en la muñeca del robot son capaces de medir las fuerzas de interacción y, en función de ellas, reposicionar el elemento terminal mediante servomecanismos. Estos dispositivos son más complejos que los anteriores y hasta el momento no han aportado mejores soluciones.

Finalmente, la forma más general de abordar el problema es haciendo que sea el mismo robot, mediante la acción de los actuadores que mueven sus articuladores, el que realice las correcciones necesarias de la trayectoria predefinida, en función de las fuerzas de interacción con el entorno que aparezcan en el desarrollo de la tarea.

Estas dos últimas formas de corregir la posición del elemento terminal del robot se encuadran en la categoría de *acomodación activa* [Basañez86a], que implica dotar al robot de un sistema de control de fuerza y, por lo tanto, de los sensores necesarios para medirlas.

Existe también otro grupo de tareas, que si bien en algunos casos no necesitan de gran precisión por parte del robot, requieren necesariamente del control de fuerzas. Ejemplos de ellas los encontramos en las tareas de pulido, desbarbado y operaciones de acabado en general [Stepien85a].

### 2. Aspectos relacionados con el control de fuerza

El control de fuerza trae aparejadas otras problemáticas afines cuya resolución es, en algunos casos, estrictamente necesaria. Así, se pueden enumerar los siguientes aspectos:

#### 1. Elección de la trayectoria a seguir por el robot.

La trayectoria óptima para realizar una tarea puede variar notablemente si se dispone de un control de fuerza. Se pasa entonces de considerar una trayectoria en el espacio libre, elegida bajo criterios tales como camino más corto o de menor riesgo de choque, a considerar trayectorias programadas que pueden ser irrealizables, pero que, con un adecuado control de fuerza, pueden

## Control de fuerza en robótica

transformarse en las trayectorias reales más sencillas y efectivas.

Esto se ejemplifica en la figura 2, que ilustra un típico caso de inserción cilíndrica. Esta tarea realizada sólo con un control de posición requiere hacer un compromiso entre las exigencias de precisión y el riesgo de fallo (atasco de la pieza), en tanto que un adecuado control de posición y fuerza permite elegir como trayectoria nominal la que une en línea recta las posiciones iniciales y finales, garantizándose el éxito en la tarea con precisiones mucho menores.

2. *Elección del sistema de coordenadas para el control de fuerzas.* La geometría de las partes y, en algunos casos, los requerimientos propios de la tarea, hacen que algunos sistemas de coordenadas faciliten notablemente la expresión de las especificaciones de posición y fuerza que se deben cumplir durante la ejecución de la misma [Mason81a]. Simultáneamente, debe tenerse en cuenta que las transformaciones en línea de fuerzas y posiciones de un sistema de coordenadas a otro acarrean un tiempo que puede ser crítico (estas transformaciones dependerán de cuál sea la posición de los sensores de fuerza y el tipo de control que se use). El sistema de coordenadas en el que se expresan las consignas de posición y fuerza se denomina *marco de acomodación*. Para el ejemplo de inserción mostrado en la figura 2, el marco de acomodación más apropiado es el denotado como  $(x, y)$  y está referido a la pieza a insertar.
3. *Determinación de consignas de fuerza según cada eje, y/o de la relación entre los errores de posición y la fuerza.* Además de la elección de los ejes coordenados existe el problema de determinar correctamente la forma de comportamiento se-

gún cada eje. Por lo tanto, al elegir la estrategia de solución de la tarea debe definirse cuál será este comportamiento y los valores de los parámetros para que aquélla se cumpla adecuadamente.

A modo de ejemplo, si para el caso de inserción mostrado en la figura 2b se decide aplicar un control de amortiguamiento (detallado en los siguientes apartados), el paso siguiente reside en determinar valores correctos de amortiguamientos según cada eje, en función de los materiales de las piezas, los valores de fuerzas permisibles y la estabilidad del sistema de control.

4. *Realización de los tres aspectos anteriores de forma automática.* Esto equivale a determinar automáticamente una estrategia de solución de la tarea [Buckley87a] [Erdmann86a] y, a su vez, requiere fundamentalmente del desarrollo de los siguientes items:

- a) El estudio de las tareas en sí mismas, propiedades, requisitos y formas de solución [Nevins77a] [Whitney82a]. Consideración del caso de cuerpos elásticos.
- b) Modelado de la tarea para poder predecir las condiciones de fuerza que aparecen en cualquier configuración, o al menos, acotarlas en función de la incertidumbre de posición existente. Estudio especial de las fuerzas de fricción y su modelado.

5. *Localización y tipo de sensores de fuerza.* Las fuerzas pueden medirse de cuatro modos diferentes según la ubicación de los sensores [Shimano78a], que pueden estar:

- a) *en la muñeca del robot:* es el caso más difundido y que parece presentar mayores ventajas en

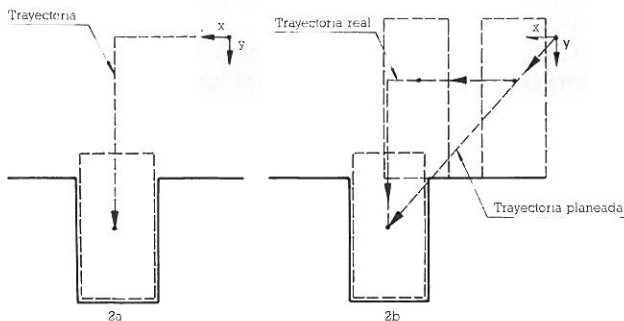


Fig. 2. Diferentes trayectorias en una inserción cilíndrica.

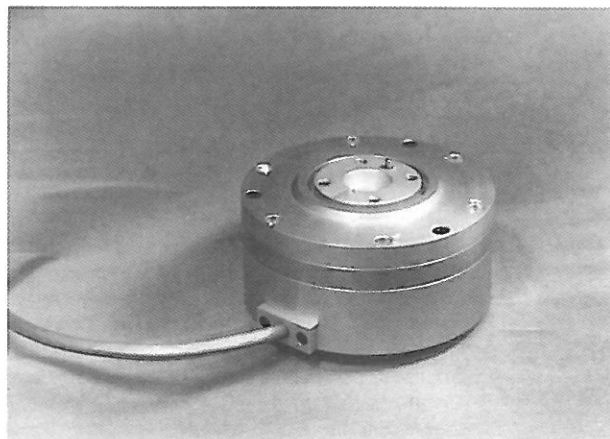


Fig. 3. Sensor de fuerzas para la muñeca de un robot. Este sensor da directamente los valores de fuerza y par según ejes cartesianos por una línea RS - 232C.

## Control de fuerza en robótica

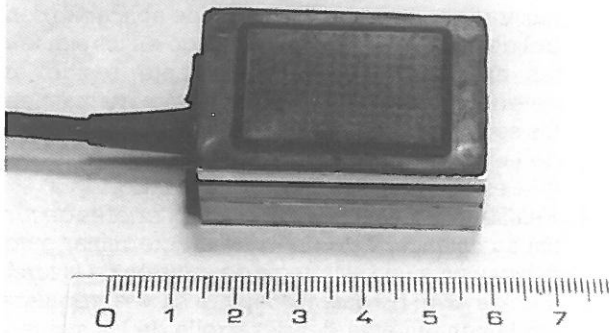


Fig. 4. Sensor para la pinza de un robot. Posee una matriz de 10 por 16 sensores táctiles con 30 niveles de profundidad y una resolución de 0,001 de pulgada cada uno.

### Nomenclatura

La nomenclatura común a todos los esquemas de control que se usará es la siguiente:

$F_d$ :	vector de consignas de fuerza en coordenadas cartesianas
$P_d$ :	vector de consignas de posición en coordenadas cartesianas
$F_a$ :	vector de fuerzas medidas en coordenadas cartesianas
$P_a$ :	vector de posiciones medidas en coordenadas cartesianas
$Q_d$ :	vector de consignas de posición en coordenadas del robot
$Q_a$ :	vector de posiciones medidas en coordenadas del robot
$T_a$ :	vector de fuerzas medidas en coordenadas del robot
$\Delta P$ :	vector de errores de posición en coordenadas cartesianas
$\Delta Q$ :	vector de errores de posición en coordenadas del robot
$J$ :	Jacobiano, matriz de transformación de velocidades del sistema de coordenadas del robot a coordenadas cartesianas ( $\dot{P}_a = J \cdot \dot{Q}_a$ ). De igual modo transforma los errores de posición expresados en coordenadas del robot a coordenadas cartesianas ( $\Delta P = J \cdot \Delta Q$ )
$H$ :	matriz de transformación del vector de posición expresado en coordenadas del robot a coordenadas cartesianas ( $P_a = H \cdot Q_a$ )

cuanto a versatilidad y robustez. La figura 3 ilustra un sensor de fuerzas para ser colocado en la muñeca del robot. Este sensor proporciona directamente los valores de fuerza y par según ejes cartesianos por una línea RS - 232C; también dispone de una salida analógica por la que puede seguirse la evolución de cualquiera de las fuerzas o pares.

b) *en los dedos de la pinza del robot*: el montaje de los sensores es más delicado y requiere pinzas especiales. La figura 4 muestra un sensor de este tipo que además de dar los 6 valores de fuerza y par, posee una matriz de 10 por 16 sensores táctiles con 30 niveles de profundidad y una resolución de 0,001 de pulgada cada uno.

c) *en las articulaciones del robot*: permite detectar fuerzas de interacción en cualquier parte del brazo, no sólo en el elemento terminal. Es práctico para trabajos con valores de fuerza elevados y se realiza, normalmente, midiendo las corrientes de armadura de los motores para determinar así el par aplicado.

d) *en una plataforma soporte de la pieza ajena al robot*: pierde versatilidad, pues se requiere una adaptación a cada tarea. Como contrapartida pueden lograrse mayores precisiones en la medida, pues no depende en absoluto de la configuración del brazo.

La elección de uno u otro método implica también tener que realizar diferentes transformaciones de coordenadas para adecuarse al tipo de control elegido.

6. *Problemas de estabilidad*. Es una problemática asociada a cualquier sistema de control. No se pretende analizar aquí este punto en profundidad, por lo que sólo mencionaremos que el problema de estabilidad es particularmente crítico en el momento de toma de contacto con una superficie y en el de pérdida de contacto con la misma, y que la estabilidad mejora notablemente cuanto más elásticos son los cuerpos que interactúan [Whitney85a] [An86a].
7. *Adecuado filtrado de las señales*. No tiene características particulares y son aplicables las teorías generales de filtros y tratamientos de señales.
8. *Elección del esquema de control más adecuado en cada caso*. Una vez definido el comportamiento deseado, debe elegirse el esquema de control que mejor lo lleve a cabo.

Los tres primeros aspectos han sido tradicionalmente realizados de manera intuitiva por el operador, por lo cual se ha demorado bastante la aparición de teorías sólidas al respecto.

El cuarto aspecto, como consecuencia de lo anterior, se encuentra absolutamente en sus comienzos,

## Control de fuerza en robótica

aunque a nivel de laboratorio de investigación empiezan a aparecer algunas soluciones. En este campo es necesario profundizar de forma especial en los dos items (a) y (b) mencionados a fin de dar una base sólida al problema.

El quinto está bien estudiado en cuanto a localización de los sensores. Los desarrollos están centrados ahora en los aspectos tecnológicos, con el fin de lograr mejores prestaciones y reducir su tamaño y peso. Otro desarrollo interesante es la realización de un sensor para ser colocado en la muñeca del robot que tiene además la capacidad de deformación de los elementos de acomodación pasiva. Este elemento, denominado IRCC (*Instrumented Remote Center Compliance*) [De Facio84a] suministra la información necesaria para realizar acomodación activa, cuyos problemas de estabilidad disminuyen al incluir la posibilidad de deformación mecánica, aprovechando simultáneamente las ventajas propias de la acomoda-

dación pasiva.

Los tres últimos aspectos hacen referencia a problemas típicos de cualquier sistema de control, de modo que pueden aplicarse teorías y análisis ya desarrollados. Son los puntos en los que hay más trabajo realizado hasta el momento y en los que se tiene conclusiones más concretas.

### 3. Comportamientos típicos deseados en control de posición y fuerza

A continuación se enumeran y comentan brevemente los distintos comportamientos típicos buscados mediante el control de posición (P) y fuerza (F). Cada uno de ellos tiene asociado un tipo diferente de control, que puede ser logrado mediante distintos esquemas que se describirán más adelante.

La figura 5 muestra gráficamente diferentes situaciones para una superficie dada, suponiendo un con-

Control solamente de posición o velocidad según x  
Una superficie como la siguiente

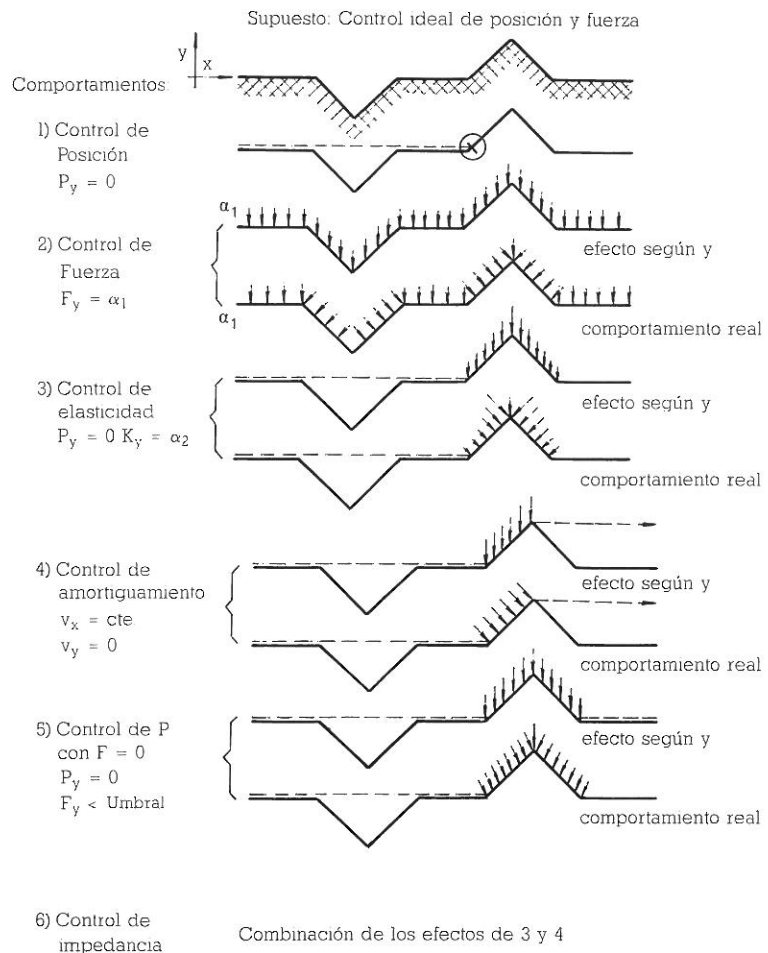


Fig. 5. Esta figura muestra diferentes situaciones para una superficie dada, suponiendo un control de posición y fuerza de características ideales. Cada uno de los distintos comportamientos tiene asociado un tipo de control, que puede ser logrado mediante distintos esquemas.



## Control de fuerza en robótica

Control de posición y fuerza de características ideales. En todos los casos se realiza un control únicamente de posición o velocidad según el eje  $x$ , en tanto que es según el eje  $y$  que se aplican los diferentes tipos de control de posición / fuerza. Para cada caso se dan dos gráficas; la primera de ellas muestra el efecto logrado según el eje  $y$ , y la segunda (figura 2), las fuerzas de interacción reales. La línea discontinua indica la trayectoria seguida cuando no hay fuerzas de interacción.

1. *Control de P solamente.* Es útil cuando se trabaja en el espacio libre, pero puede presentar problemas cuando hay interacción entre el robot y su entorno de trabajo. Una imprecisión en la posición puede producir atascos o fuerzas desmedidas que dañen las piezas o el robot mismo. El ejemplo de la figura 5 muestra la trayectoria seguida al desplazarse según la coordenada  $x$  manteniendo la consigna  $P_y = 0$ , terminando en un atasco de fuerzas impredecibles ante un obstáculo.
2. *Control de F solamente.* Se trata de cumplir una consigna de fuerza, independientemente de la posición en la que se encuentre. Sólo tiene sentido cuando se garantiza contacto entre el robot y el entorno de trabajo, de lo contrario, el robot se *perdería* al no tener posición de referencia. Adolece por lo general de problemas de estabilidad y elevadas sobreelongaciones en el impacto inicial. En la figura 5 se muestra el efecto ideal logrado al desplazarse sobre la superficie manteniendo una fuerza constante según el eje  $y$ .
3. *Control de P con F proporcional al error de P (Control de elasticidad).* Se establece una relación lineal entre el error de posición  $\Delta P$  y  $F$ , con lo que el efecto logrado es equivalente al de un resorte que ejerce una fuerza de reacción proporcional a su deformación. La figura 5 ilustra como, admitiendo elasticidad según  $y$ , no se produce atasco, sino que aumenta la componente de fuerza  $F_y$  al alejarse de la posición de consigna  $P_y = 0$ .
4. *Control de P con F proporcional al error de velocidad (Control de amortiguamiento).* Se establece una relación lineal entre el error de velocidad  $\Delta V$  y  $F$ , con lo que el efecto logrado es el de un amortiguador viscoso que produce una fuerza de reacción proporcional a la velocidad con que se lo pretenda desplazar. En la figura 5 se muestra la trayectoria seguida al desplazarse según  $x$  con una consigna de velocidad  $V_y = 0$ . Debe notarse que cuando la posición según  $y$  es forzada a cambiar por un obstáculo, después no es recuperable, y que la fuerza ejercida contra el obstáculo es proporcional a la velocidad según  $x$ .
5. *Control de P con umbral de fuerza.* El comportamiento es el de un control de posición, con la particularidad de que, cuando ante un obstáculo aparecen fuerzas superiores a un umbral prede-

finido, tiene prioridad el intentar mantener el valor de fuerza dentro del rango permisible. En la figura 5 se muestra este efecto según el eje  $y$  mientras se realiza un desplazamiento según  $x$ .

6. *Control de impedancia.* Se intenta producir una fuerza de reacción proporcional a la variación de energía cinética y potencial del móvil respecto a una referencia. El efecto logrado es una combinación lineal del control de elasticidad y amortiguamiento.

### 4. Criterios para clasificar los esquemas de control de posición y fuerza

Varios son los criterios que se pueden seguir para clasificar los sistemas de control de P / F, lo que hace complicada la realización de una tabla de clasificación, pues debería ser de múltiples entradas. Las clasificaciones presentadas en la bibliografía existente hasta el momento sólo contemplan algunos de los criterios, elegidos según sea el aspecto que en cada caso interesa poner de manifiesto [Whitney85a] [Maples86a] [Simons85a].

La postura que se adoptará aquí será enumerar cada posible criterio de clasificación y dar una descripción de las principales características o cualidades de cada uno de los grupos resultantes. En el apartado siguiente se mostrarán ejemplos concretos de propuestas de esquemas de control P / F, discutiéndose su clasificación según los criterios aquí descritos.

Las posibles clasificaciones se realizan entonces según los siguientes criterios.

#### 4.1. Existencia de realimentación de fuerza

- *No hay realimentación de fuerza.* Es el caso más rudimentario que se puede plantear. La fuerza ejercida contra un obstáculo se varía (en lazo abierto), modificando la ganancia del control de posición, y se denomina *control implícito de fuerza*. La forma general se ilustra en la figura 6a.
- *Si hay realimentación de fuerza.* Es el caso más normal cuando se quiere trabajar con control de fuerza, e implica disponer de sensores que permitan conocer de forma explícita los valores de las fuerzas de interacción. La forma general se ilustra en las figuras 6b, 6c y 6d.

#### 4.2. Requerimiento de consignas de fuerza por parte de la tarea

- *No hay consigna de fuerza.* La tarea no tiene en sí misma requerimientos de fuerza, con lo cual éstas sólo se producen ante la presencia de obstáculos en una trayectoria predefinida que producen forzosamente errores de posición. Aunque puede que no exista realimentación de fuerza, si la hay, se usan controles de elasticidad o amortiguamiento, en los que el sistema tiene como entrada sólo

## Control de fuerza en robótica

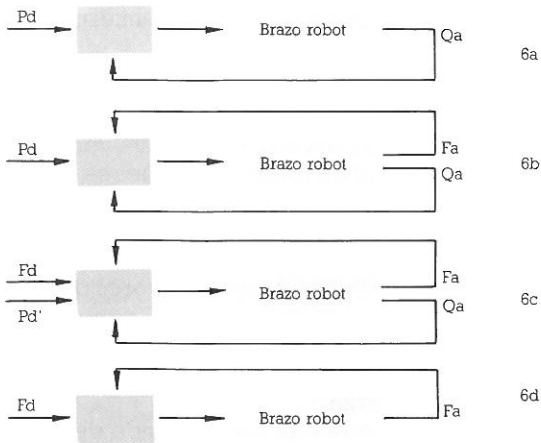


Fig. 6. Esquemas de control de posición y fuerza.

referencias de posición. La forma general coincide con la representada en las figuras 6a y 6b.

- *Si hay consigna de fuerza.* La tarea, o la estrategia planteada para resolverla, necesita que se cumplan determinados valores de fuerza. Un ejemplo se tiene en el pulido, donde la herramienta debe trabajar sobre una superficie a una presión determinada. Estos casos exigen un control directo de fuerza, con lo que aparece como entrada una consigna de fuerza pudiendo o no existir la de posición (figuras 6c y 6d).

### 4.3. Modo de usar los valores de fuerza medidos

- *Método de decisión lógica.* Las fuerzas de interacción medidas se usan como condiciones para finalizar un determinado movimiento o para seleccionar el movimiento a realizar. De este modo, las tareas se resuelven con una serie de movimientos, cada uno de los cuales finaliza con una condición de posición o de fuerza. Ejemplos de comandos para este último tipo de movimientos serían:

MOVERSE según y HASTA QUE  $F_y > F_u$   
GIRAR según y HASTA QUE  $T_y > T_u$

siendo  $F_y$  y  $T_y$  la fuerza y par medidos según el eje  $y$ , y  $F_u$  y  $T_u$  valores definidos de umbral de fuerza y par.

Las magnitudes de las fuerzas no tienen requerimientos críticos, salvo en el sentido binario mencionado, es decir, que superen el umbral o no. Tampoco son críticos los problemas de dinámica, pues la estrategia de solución de la tarea puede funcionar independientemente de problemas como los generados por inercias o variaciones dinámicas de las fuerzas de fricción. Aunque rudimentario, el mé-

todo de decisión lógica puede considerarse como un antecesor de los sistemas de control mediante reglas.

- *Método de decisión continua.* Se denomina así al control multidimensional de las fuerzas y pares y de sus relaciones con el movimiento continuo y coordinado de las articulaciones del robot.

En este método son importantes las consideraciones dinámicas, pues el control de las fuerzas de interacción se lleva a cabo de una manera permanente tanto en lo que se refiere a dirección como a magnitud. Es un método más general que el anterior, ya que un control de este tipo permite trabajar en el modo de decisión lógica. Como contrapartida, implica mayor complejidad en el control, particularmente en lo relacionado con problemas de estabilidad. La tendencia en los trabajos de control de P / F más actuales está en esta línea.

### 4.4. Influencia relativa de los lazos de realimentación de posición (P) y fuerza (F)

- *Lazo de P interior y lazo de F exterior.* Con esta configuración se puede realizar el control de elasticidad, amortiguamiento e impedancia. La señal de error que llega al servomecanismo es indicativa de un error de posición [Simons85a]. La forma general se ilustra en la figura 7a.
- *Lazo de F interior y lazo de P exterior.* Los tipos de control que se pueden realizar son los mismos que en el caso anterior, y la diferencia radica en las transformaciones de coordenadas a realizar en uno y otro caso. La señal de error que llega al servomecanismo es indicativa de un error de fuerza. Tanto en este caso como en el anterior se puede hacer que los lazos trabajen con velocidades de muestreo diferentes (figura 7b).
- *Lazos P y F en paralelo.* Se usa para realizar lo que se llama un *control híbrido*. En el sistema de coordenadas cartesianas se seleccionan unos ejes sobre los que se controla fuerza, y sobre los restantes se controla posición, haciendo que cada articulación del robot corrija simultáneamente los errores de posición y fuerza (figura 7c). La selección de las coordenadas sobre las que controlar fuerza se realiza en función de las restricciones geométricas que imponga la tarea [Mason81a].
- *Lazos desacoplados.* En este caso una articulación se usa para controlar la fuerza que ejerce el brazo según un cierto grado de libertad cartesiano, y las restantes para controlar su posición. El método tiene imprecisiones inherentes al mismo, siempre que el movimiento de la articulación elegida para ope-

## Control de fuerza en robótica

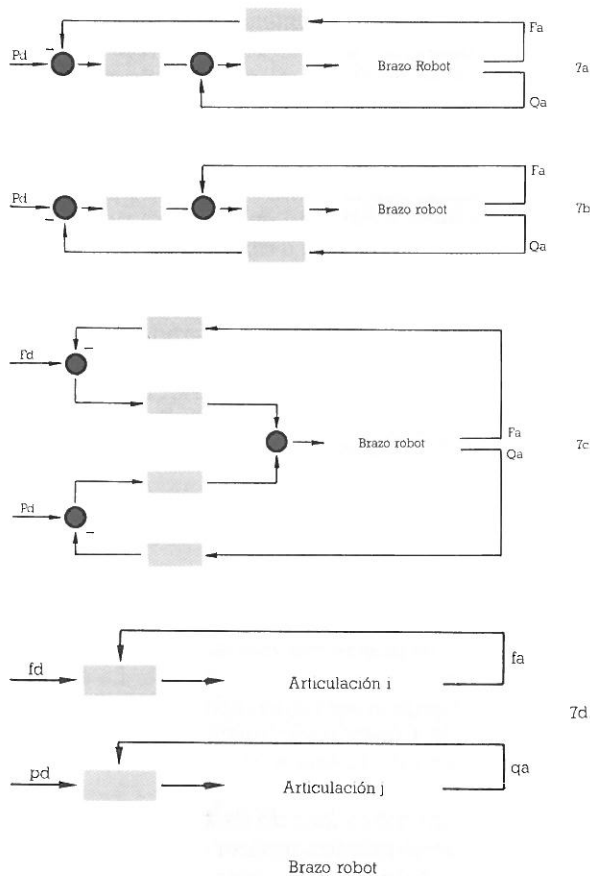


Fig. 7. Esquemas de la influencia relativa de los lazos de realimentación de posición y fuerza. 7a: lazo de P interior y lazo de F exterior; 7b: lazo de F interior y lazo de P exterior; 7c: lazos P y F en paralelo; 7d: lazos desacoplados.

rar en fuerza no coincida exactamente con la acción necesaria en coordenadas cartesianas, lo que sucederá en la mayoría de los casos. Este tipo de control se denomina de *articulación libre* (figura 7d) [Paul76a].

### 4.5. Coordenadas donde se evalúa el error

- **Coordenadas cartesianas.** Como las consignas son definidas normalmente en coordenadas cartesianas referidas al marco de acomodación de la tarea, las fuerzas medidas pueden pasarse fácilmente a este sistema. Sin embargo, las coordenadas de posición deben obtenerse a partir de las posiciones de las articulaciones, para volver a ellas después de evaluar el error. Esto implica cierto volumen de cómputo que puede considerarse como una desventaja. La ventaja radica en que en

coordenadas cartesianas es más fácil interpretar los errores.

- **Coordenadas del robot.** Como en última instancia la actuación del robot es a nivel de las articulaciones, calcular el error allí mismo presenta ventajas en cuanto a cantidad de transformaciones se refiere y, por tanto, de volumen de cómputo. Las desventajas estriban en que las transformaciones de fuerza son un poco más complejas, así como el manejo, selección y tratamiento de los errores definidos en coordenadas cartesianas.

### 4.6. Según sobre qué lazo se procesa la señal de fuerza

Esta clasificación se realiza dependiendo de cuál es la variable sobre la que acciona el bucle que recibe la realimentación de fuerza. Las posibilidades son: *posición*, servomecanismo de posición; *velocidad*, servomecanismo de velocidad; *fuerza*, servomecanismo de fuerza o par.

### 4.7. Según cuál sea el efecto buscado

Los efectos buscados ya fueron expresamente descritos en el apartado 3 y pueden lograrse con diferentes esquemas. Las posibilidades son: *control híbrido*, *control de elasticidad*, *control de amortiguamiento* y *control de impedancia*.

## 5. Esquemas básicos de control de posición y fuerza

En este apartado se presentan algunos ejemplos de esquemas de control P / F y se ilustran las principales características de cada uno de ellos. Existen realizaciones de estos controles con varias modificaciones que intentan optimizar su funcionamiento.

### 5.1. Control implícito de fuerza

Los esquemas de las figuras 8a y 8b muestran el caso más simple que se puede presentar, ya que el control de fuerzas es en lazo abierto. El control de la fuerza se lleva a cabo mediante la variación de la ganancia del bucle de control de posición. Estos esquemas no tienen realimentación de fuerza y pueden ser usados cuando ésta no es un requerimiento para la tarea. Al no tener realimentación de fuerza escapa a los demás criterios de clasificación.

El esquema de la figura 8b es mejor en cuanto a cómputo se refiere, debido a que las transformaciones han sido sacadas del lazo de control, calculándose el error de posición directamente en coordenadas del robot.

### 5.2. Control explícito de fuerza

Un esquema de control explícito de fuerza se muestra en la figura 9, donde la entrada es ahora una consigna de fuerza en vez de posición. En este caso, los



## Control de fuerza en robótica

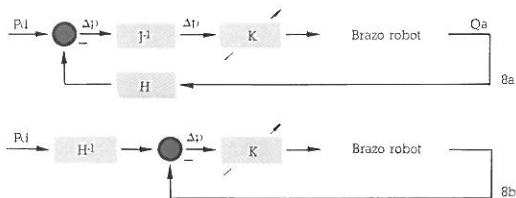


Fig. 8. Caso más simple de control de fuerza. Estos esquemas no tienen realimentación de fuerza y pueden ser usados cuando ésta no es un requerimiento para la tarea.

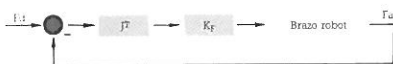


Fig. 9. Esquema de control explícito de fuerza. La entrada es una consigna de fuerza en vez de posición.

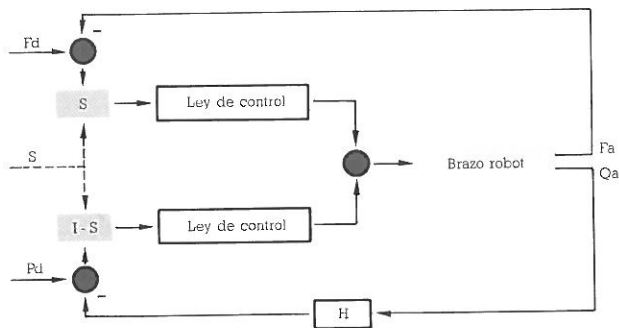


Fig. 10. Esquema básico de control híbrido de posición / fuerza.

criterios de clasificación son: existe realimentación de fuerza, la fuerza es necesariamente un requerimiento para la tarea, es un método de decisión continua, sólo tiene un lazo de control de fuerza, el error se evalúa en coordenadas cartesianas, la señal de fuerza es procesada sobre un lazo de control de fuerza y el efecto buscado es el control de fuerza solamente.

Este tipo de control necesita tener garantizadas restricciones en los grados de libertad del robot para asegurar la existencia de contacto, de lo contrario el robot se perdería por falta de referencia de posición.

### 5.3. Control híbrido de posición / fuerza

El objetivo del control híbrido es controlar fuerza según algunos ejes de un sistema de coordenadas cartesianas y controlar posición en todos los restantes, haciendo que todas las articulaciones del robot contribuyan a seguir ambos conjuntos de consignas.

El esquema básico de este tipo de control se muestra en la figura 10 [Raibert81a]. Siguiendo los criterios de clasificación planteados en el apartado anterior, podemos decir que es un esquema que incluye realimentación de fuerza, la fuerza será un requerimiento para la tarea (o al menos para la estrategia de control planteada), es un método de decisión continua, los lazos de control de fuerza y posición son paralelos, los errores de posición y de fuerza se evalúan en coordenadas cartesianas en el marco de acomodación, la señal de fuerza actúa sobre un lazo de fuerza y el efecto buscado es el control solamente de fuerza según unos ejes cartesianos y solamente de posición, según otros.

En este esquema, la señal de control para cada actuador es del tipo,

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n [\Phi_{ij} (s_j \cdot \delta f_j) + \Psi_{ij} ((1 - s_j) \cdot \delta p_j)] \quad (1)$$

donde:

- $T_i$ : para aplicar por el actuador  $i$ .
- $\delta f_j$ : error de fuerza en la componente  $j$  del sistema de coordenadas cartesianas
- $\delta p_j$ : error de posición en la componente  $j$  del sistema de coordenadas cartesianas
- $\Phi_{ij}$ : función de transferencia entre el error de fuerza en la componente cartésiana  $j$  y la articulación  $i$
- $\Psi_{ij}$ : función de transferencia entre el error de posición en la componente cartésiana  $j$  y la articulación  $i$
- $s_j$ : Componente del vector de selección  $[s]$ .

Cada uno de los términos de la sumatoria de (1) es la aportación de los lazos de control de fuerza y posición respectivamente. Es importante notar la inclusión de los elementos  $s_j$ . Estos son componentes de un vector de selección de coordenadas  $s$  compuesto por unos y ceros según corresponda control de fuerza o posición, y que coincide con la diagonal de la matriz de selección  $S$  que aparece en la figura 10. Por lo tanto, si por ejemplo se desea controlar fuerza y par según el eje  $z$  del sistema cartesiano, y posición y giro según los ejes  $x$  y  $y$ , el vector de selección será  $[s] = (001001)^T$ , representando los 3 primeros elementos traslación o fuerza según cada eje coordinado y los 3 últimos rotación o par sobre los mismos ejes. La matriz de selección será entonces,

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

## Control de fuerza en robótica

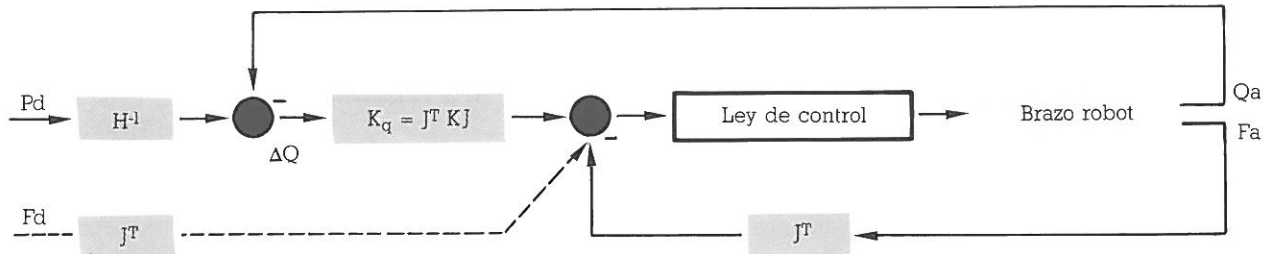


Fig. 11. Esquema de control activo de elasticidad en coordenadas cartesianas.

La matriz de selección  $S$  opera sobre los errores calculados en el marco de acomodación, por lo que es necesario resolver el problema cinemático directo para calcular la posición del brazo en estas coordenadas a partir de la posición de cada articulación. Lo mismo pasa con las lecturas de fuerza si los sensores se encuentran sobre el manipulador. Ambas transformaciones no son fijas, sino que dependen de la configuración del brazo, por lo que acarrearán un importante volumen de cómputo que llega a ser una limitación del método.

### 5.4. Control activo de elasticidad en coordenadas cartesianas

El concepto básico de un control de elasticidad, como ya se ha dicho, reside en establecer una relación lineal entre la fuerza realizada y el error de posición. Esto equivale a la ley de Hooke, que al extenderla a 6 dimensiones (3 translaciones y 3 rotaciones) puede ponerse en forma matricial como:

$$F_a = K \cdot \Delta P \quad (2)$$

donde  $F_a$  es el vector de fuerzas realizadas,  $K$  es la matriz de elasticidad y  $\Delta P$  es el vector de errores de posición respecto a la posición deseada  $P_d$ , todos expresados en coordenadas cartesianas.

Un esquema para realizar este tipo de control es el mostrado en la figura 11 [Salisbury80a]. Según los criterios de clasificación planteados, este esquema incluye realimentación de fuerza, la fuerza no es en general un requerimiento para la tarea (aunque con este esquema se puede actuar como un control de fuerza puro), es un método de realimentación continuo, tiene un lazo interior de control de fuerza y un lazo exterior de control de posición, el error es evaluado en coordenadas del robot, la señal de fuerza se procesa sobre un lazo de fuerza, y el efecto buscado es el control de elasticidad.

Dado que el error es evaluado en coordenadas del robot, es necesario encontrar la relación equivalente

a (2) en estas coordenadas. Para ello se parte de la relación entre el error de posición expresado en coordenadas cartesianas y en coordenadas del robot mediante el Jacobiano  $J$ ,

$$\Delta P = J \cdot \Delta Q \quad (3)$$

De igual modo se tiene como relación entre los pares en las articulaciones y las fuerzas en coordenadas cartesianas,

$$T_a = J^T \cdot F_a \quad (4)$$

con lo que usando las expresiones (2), (3) y (4) puede escribirse,

$$T_a = J^T \cdot F_a = J^T \cdot K \cdot J \cdot \Delta Q = K_q \cdot \Delta Q$$

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

Es de hacer notar que la matriz  $K$  expresada en el marco de acomodación es por lo general diagonal, siendo sus elementos no nulos la elasticidad deseada según cada eje. La matriz  $K_q$  resulta claramente no diagonal, lo que significa que un error de posición en la articulación  $q_i$  producirá fuerzas y / o pares en otras articulaciones  $q_j$ .

La línea discontinua en el esquema de la figura 11 simboliza la posibilidad de inclusión de un valor de fuerza deseado, causando el siguiente efecto: si un valor en la diagonal de  $K$  se pone a cero, es decir, elasticidad nula, se puede establecer sobre el eje correspondiente un control de fuerza puro, en el que  $F_d$  es la consigna expresada en el marco de acomodación.

### 5.5. Control de amortiguamiento

El control de amortiguamiento implica una relación lineal entre las fuerzas ejercidas y el error de velocidad, y éste es el efecto que se logra con el esquema de la figura 12a, que puede reacomodarse

## Control de fuerza en robótica

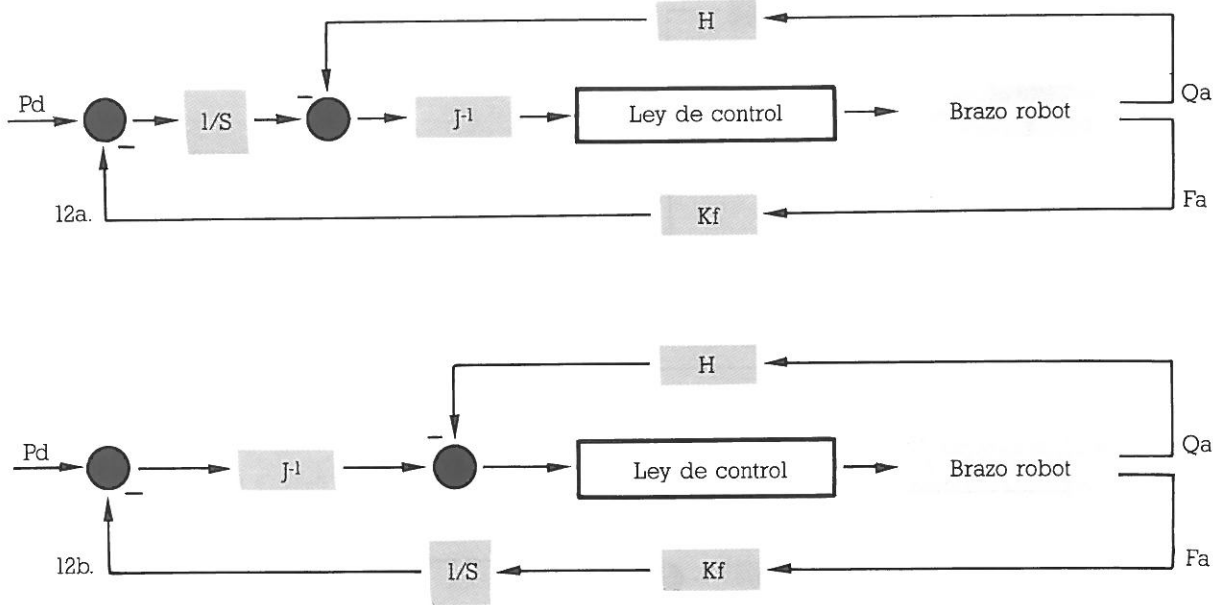


Fig. 12. El control de amortiguamiento implica una relación lineal entre las fuerzas ejercidas y el error de velocidad. Este es el efecto que se logra en el esquema de la figura 12a, que puede reacomodarse para su mejor comprensión como se muestra en la figura 12b.

para su mejor comprensión como se muestra en la figura 12b. [Whitney77a].

En este esquema existe realimentación de fuerza, la fuerza en sí misma no es un requerimiento para la tarea, es un método de decisión continua, tiene un lazo de control de posición interior y un lazo de control de fuerza exterior, el error (en el que interviene la fuerza) se evalúa en coordenadas cartesianas, la señal de fuerza se procesa sobre un lazo de control de amortiguamiento, y el efecto buscado es el control de amortiguamiento.

Existe un sistema de coordenadas, normalmente el marco de acomodación, en el que la matriz  $K_f$ , que tiene dimensiones [velocidad / fuerza], suele ser diagonal. Sus valores no nulos relacionan las fuerzas medidas con los cambios de velocidad. Es decir  $K_f$  es del tipo,

$$K_f = \begin{pmatrix} k_{f1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{f2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{f3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{f4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{f5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{f6} \end{pmatrix}$$

Otra característica de este sistema es que si la

velocidad deseada es cero, es decir, el manipulador se halla en la posición deseada y se le aplica una fuerza externa al extremo del brazo, éste saldrá de la posición actual con una velocidad proporcional a la fuerza que se aplique. Por ejemplo, se podría en este caso mover el manipulador conduciéndolo con la mano.

### 5.6. Control de impedancia

La figura 13a muestra un sistema de control de impedancia [Hogan80a]. En este ejemplo se ve claramente que la fuerza se realimenta sobre un lazo de posición y otro de velocidad en paralelo, con lo que se visualiza fácilmente el efecto total como suma de los efectos de amortiguamiento y elasticidad.

Según los criterios de clasificación mencionados se puede decir que existe realimentación de fuerza, la fuerza no es un requerimiento para la tarea, es un método de decisión continua, el lazo de fuerza se cierra al mismo nivel que los de posición y velocidad, los errores se evalúan en coordenadas cartesianas, la señal de fuerza se procesa sobre un lazo de velocidad y otro independiente de posición y, finalmente, el efecto buscado es el control de impedancia. Como característica particular de este esquema debe notarse que incluye una realimentación de velocidad.

## Control de fuerza en robótica

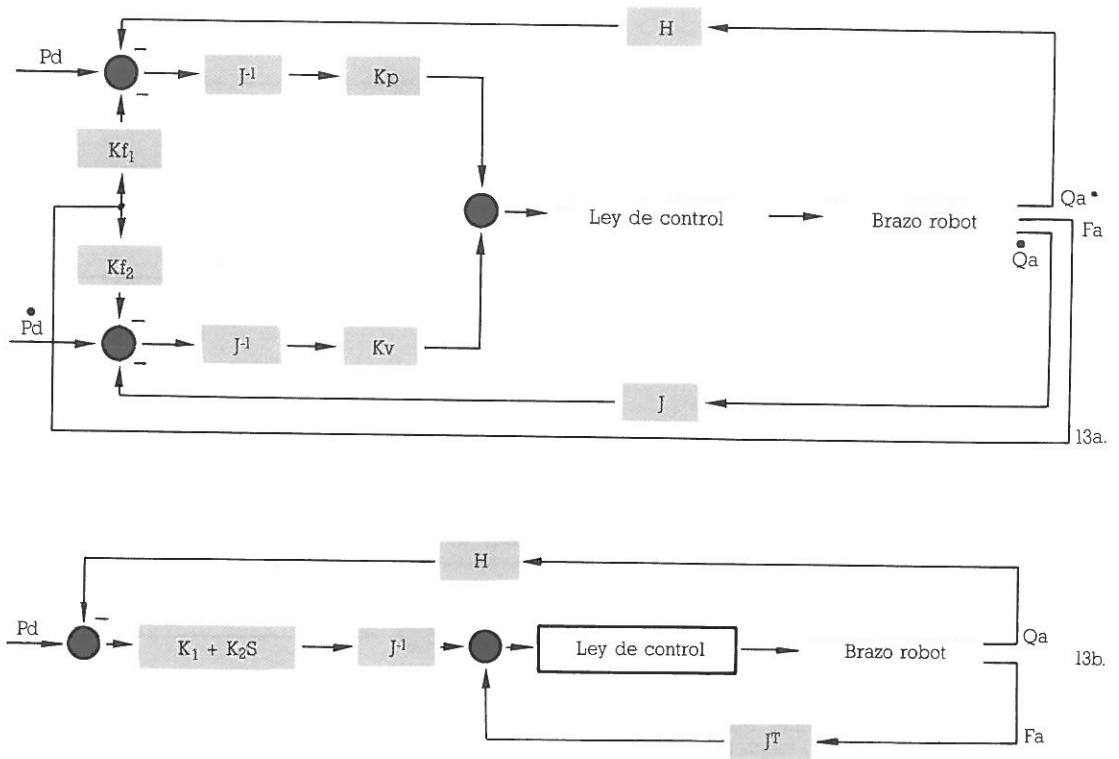


Fig. 13. Esquema de un sistema de control de impedancia. En este caso la fuerza se realimenta sobre dos lazos: uno de posición y otro de velocidad (13a). En el esquema 13b los lazos de posición y velocidad han sido sustituidos por un único lazo de posición, suprimiéndose la realimentación de velocidad.

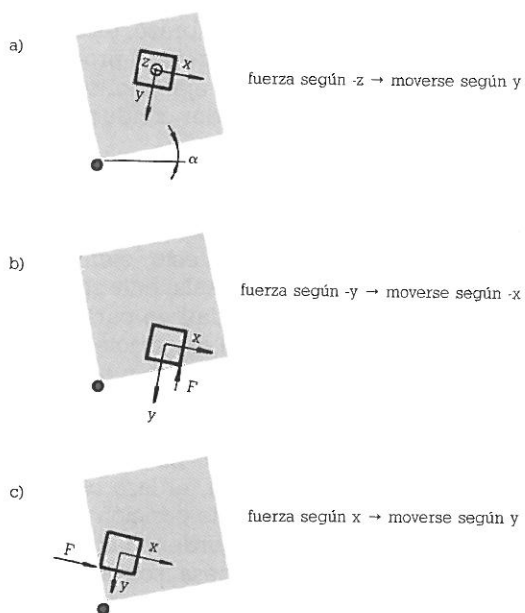


Fig. 14. Vista superior de una caja y del bloque que se desea posicionar en la esquina de la caja marcada con un punto.

Otro esquema que permite realizar un control de impedancia es el que aparece en la figura 13b, en el que los lazos de posición y velocidad han sido sustituidos por un único lazo de posición, suprimiéndose la realimentación de velocidad.

## 6. Ejemplos de tareas resuletas con diferentes controles P / F

### 6.1. Tarea 1: posicionar un bloque en un rincón de una caja

La figura 14 representa la vista superior de una caja y el bloque que se desea posicionar en la esquina de la caja marcada con un punto. El sistema de coordenadas elegido como marco de acomodación es fijo respecto al bloque, como se muestra en la figura. Al iniciar la tarea se contempla la posibilidad de existencia de un error inicial tanto en la posición como en la orientación de la caja, con la condición de que el ángulo  $\alpha$  no sea mayor de 45 grados menos el cono de fricción, y el desplazamiento no posicione el bloque fuera de la caja.

a) *Aplicación de control de amortiguamiento.* La tarea se resuelve con una instrucción de moverse según el eje  $z$  y poniendo como elementos distintos de

## Control de fuerza en robótica

cero en la matriz de amortiguamiento los siguientes:

$$\begin{aligned} K_{f(1,2)} &= a \\ K_{f(2,1)} &= a \\ K_{f(2,3)} &= -a \\ K_{f(4,4)} &= K_{f(5,5)} = K_{f(6,6)} = b \end{aligned}$$

donde  $a$  y  $b$  son dos valores numéricos positivos apropiados. De este modo, el elemento (2,3), que liga la velocidad según  $y$  con la fuerza según  $z$ , hace que cuando se alcance el fondo de la caja y se detecte una fuerza en la dirección  $-z$ , automáticamente se comience a realizar un movimiento según el eje  $y$  (figura 14a). El elemento (1,2) hace que si al desplazarse según  $y$  se alcanza un lateral de la caja que produce una fuerza de reacción según  $-y$ , automáticamente se comience a mover en la dirección  $-x$  (figura 14b). De igual modo, el elemento (2,1) hace que una fuerza en la dirección  $x$  produzca un movimiento según  $y$  (figura 14c). Se ve entonces que sólo con el comando de mover según  $z$ , el bloque se dirigirá hacia la esquina adecuada. Los elementos diagonales (4,4), (5,5) y (6,6) que ligan las rotaciones con los pares según cada eje hacen que el bloque se reacomode paralelamente a los lados de la caja cuando choca con ellos.

b) *Aplicación del modo de decisión lógica.* Tomando decisiones según los valores de fuerza superen o no un cierto umbral, esta tarea puede resolverse con la siguiente secuencia:

```

MOVESE según z HASTA QUE  $F_z > F_{\text{umbral}}$ 
MOVESE según y HASTA QUE  $F_y > F_{\text{umbral}}$ 
CON  $F_x = 0$ 
MOVESE según  $-x$  HASTA QUE  $F_x < F_{\text{umbral}}$ 
    
```

### 6.2. Tarea 2: Inserción de un vástago en un agujero

Se desea realizar la inserción de un vástago en un agujero con bordes viselados según se muestra en la figura 15a, admitiéndose la posibilidad de un error de posicionamiento inicial del extremo del vástago que no exceda el ancho del visel. El sistema de coordenadas elegido como marco de acomodación es fijo respecto al vástago.

a) *Aplicación de control de elasticidad.* Para resolver la inserción se debe definir la matriz de elasticidad  $K$  diagonal expresada en el marco de acomodación y dar una instrucción de moverse según el eje  $z$ . Los valores de los elementos de la diagonal de  $K$  pueden elegirse de dos formas diferentes, a saber:

— Si se considera que no existe error de orientación, o que éste es suficientemente pequeño (figura 15b), a los elementos (1,1) y (2,2) se les asigna un valor pequeño y a los elementos (3,3), (4,4) y (5,5) un valor grande. El elemento (6,6) no es importante en este caso. De este modo, si el vástago

al descender según  $z$  choca contra el visel, el valor alto de  $k_{(3,3)}$  hará que se intente seguir descendiendo en tanto que los elementos de valor pequeño (1,1) y (2,2) facilitarán un desplazamiento lateral hacia el centro del agujero, manteniendo el vástago en posición vertical.

— Si se considera que existe error de orientación (figura 15c), a los elementos (4,4) y (5,5) también se les da un valor pequeño, permitiéndose de ese modo una fácil reorientación. Debe notarse que con estos valores, aunque no exista error de orientación inicial, éste puede aparecer en una primera fase de la tarea si se tiene error de desplazamiento (figura 15d), pero se corrige automáticamente al ir avanzando la inserción.

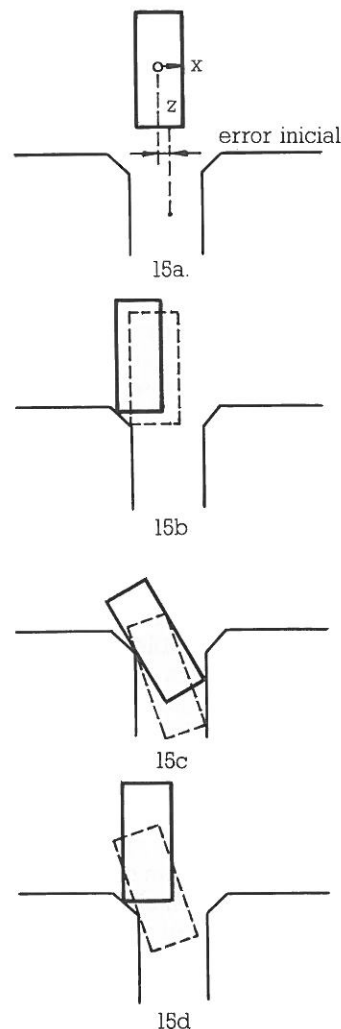


Fig. 15. Esquema de la inserción de un vástago en un agujero con bordes viselados.



## Control de fuerza en robótica

En cualquiera de los casos es posible que, al terminar la inserción, se mantenga un valor de fuerza o par proporcional al error inicial.

b) *Aplicación de control de amortiguamiento.* En este caso, la matriz  $K_f$  también debe ser diagonal, pero su elemento (3,3) debe ser pequeño, de manera que posea un aceptable grado de amortiguamiento según la dirección de descenso  $z$ . El comportamiento es similar al mostrado en la figura 2b.

Con un control de amortiguamiento, al terminar la inserción no quedan fuerzas o pares remanentes, excepto, tal vez, en la dirección de inserción.

c) *Aplicación de control híbrido.* La elección del vector de selección (diagonal de la matriz  $S$ ) se realiza de acuerdo con el siguiente razonamiento. Se desea que el vástago no ejerza fuerzas laterales en lo posible, por lo tanto se controla fuerza y par según los ejes  $x$  e  $y$ , dando como consigna el valor 0. Esto permite el reposicionamiento y reorientación del vástago, adecuándose a la posición del agujero. En la dirección  $z$  se controla posición, dando como consigna la coordenada final (inserción total). La rotación según  $z$  no es crítica, pero si se desea que se mantenga en una determinada orientación deberá controlarse en posición. El vector de selección es entonces  $[s] = (001000)^T$ .

### 7. Conclusiones

El control de posición / fuerza es uno de los temas de gran importancia en robótica que aún requiere considerable trabajo, fundamentalmente en algunos aspectos particulares, entre los que podemos destacar la elaboración de estrategias que guíen en alguna medida la elección y diseño del control de posición/fuerza adecuado para la solución de la tarea, así como la determinación de las consignas por parte del usuario. En este último caso, el objetivo final será la programación automática del robot contemplando la posibilidad de que éste pueda realizar acomodación activa. La problemática asociada que esto implica ha sido descrita en el apartado 2 con el objeto de dar una idea de su alcance y dimensiones.

Con el fin de mejorar el comportamiento del sistema de control de fuerza, así como para eliminar los problemas de estabilidad que éste conlleva, es necesario modelar el robot conjuntamente con el entorno con el que interactúa, por lo que deben extenderse los modelos dinámicos existentes para el comportamiento del robot en el espacio libre a un espacio con restricciones en el que, por ejemplo, además de las inercias, se contemplen las fricciones y fuerzas de reacción sobre el elemento terminal. Esto puede llevar a la elaboración de esquemas de control que hagan nuevas aportaciones a los esquemas básicos descritos en el apartado 5.

De las descripciones de los esquemas básicos de

control de fuerza podemos sacar las siguientes conclusiones. El control implícito de fuerza no es de utilidad práctica más allá de casos en los que la tarea se resuelva solamente mediante control de posición y se desee, de una manera muy sencilla, tener un cierto control de los valores de fuerza que pueden originarse. El control explícito de fuerza es aplicable en casos en que la garra del robot trabaja físicamente sujeta al entorno, para evitar de este modo la posible pérdida de una posición de referencia. Por ello, es poco frecuente el uso de control explícito de fuerza según todos los ejes del sistema de coordenadas, no así el control híbrido que incluye control de posición según algunos ejes.

El control híbrido tiene aplicación en gran cantidad de tareas, pero adolece del problema de necesitar una elevada cantidad de cómputo, respecto a la de los demás métodos. La determinación de las consignas y de la matriz de selección de una manera automática es un tema resuelto en función de las características geométricas ideales de las piezas, pero hace falta aún profundizar en la influencia que pueden tener en un sistema de control híbrido las tolerancias en el posicionamiento relativo de las partes.

Los controles de elasticidad y amortiguamiento son de especial aplicación en tareas que presentan problemas de posicionamiento sujetos a incerteza en la posición de las piezas (montaje de cierta precisión, por ejemplo). La elección de uno u otro depende de la estrategia de solución adoptada. Los esquemas de estos controles presentados en el apartado 5 son más sencillos en cuanto a cómputo se refiere, pero su comportamiento se deteriora cuando se trabaja cerca de singularidades en la cinemática del robot.

El control de impedancia es el más general, por cuanto puede producir efectos de elasticidad y amortiguamiento y, llevado al límite, puede emular el control híbrido. Las limitaciones radican en una mayor dificultad para definir los valores de los parámetros y un incremento en la complejidad del sistema.

En cuanto a la evaluación de errores y realización del control en coordenadas cartesianas, que implica en la mayoría de los casos una mayor carga computacional que su realización en coordenadas del robot, facilita en gran medida la elección de los valores de los parámetros, así como la selección y tratamiento de los errores, ya que las especificaciones vienen normalmente expresadas en coordenadas cartesianas. Por otra parte, algunos autores [Maples86a], basándose en pruebas experimentales, argumentan mejores resultados usando controles en coordenadas cartesianas que en coordenadas del robot, lo que justifica el incremento computacional.

El control de fuerza en robótica requiere aún mucho trabajo y desarrollo para alcanzar, a nivel industrial, la utilidad que la automatización de muchas tareas necesita.

## Control de fuerza en robótica

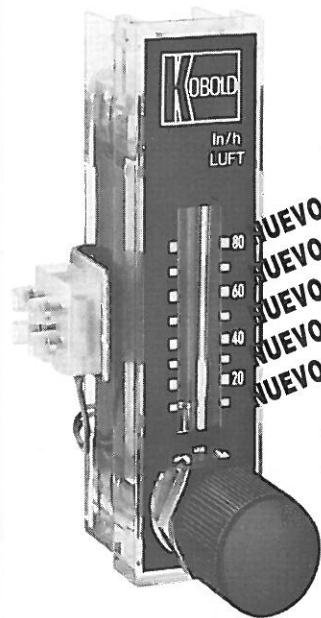
### 8. Referencias

- [An86a] An C.H. *Trajectory and Force Control of a Direct Drive Arm*, ed. MIT Artificial Intelligence Laboratory, AI-TR-912 (PhD Thesis) (1986).
- [Basañez86a] Basañez L. y Suárez R. *Control de Robots con Acomodación Activa en Revista de Robótica* (17), pp. 59-69 (enero - febrero 1986).
- [Buckley87a] Buckley S.J. *Planning and Teaching Compliant Motion Strategies*, ed. MIT Artificial Intelligence Laboratory report AI-TR-936 (Ph.D. Thesis) (1987).
- [De Facio84a] De facio T., Seltzer D. and Whitney D. *The Instrumented Remote Centre Compliance in The Industrial Robot* pp. 238-242 (December 1984).
- [Erdmann86a] Erdmann M. *Using Back Projection for Fine Motion Planning with Uncertainty in The International Journal of Robotics Research* Vol. 5 (1) pp. 19-45 (1986).
- [Hogan80a] Hogan N. *Mechanical Impedance Control in Assistive Devices and Manipulators in Proceedings of the 1980 Joint Automatic Control Conference* pp. TA10-B, San Francisco (1980).
- [Maples86a] Maples A. M. and Becker J.J. *Experiments in Force Control of Robotics Manipulators in Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 695-702, San Francisco, USA. (1986).
- [Mason81a] Mason M. T. *Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* Vol SMC-11 (6) pp. 418-432 (June 1981).
- [Nevins77a] Nevins J.L. and Whitney D.E. *Research on Advanced Assembly Automation in Computer IEEE* Vol. 10 (12), pp. 24-38 (December 1977).
- [Paul76a] Paul R.P. and Shimano B. *Compliance and Control in Proceedings of the 1976 Joint Automatic Control Conference* pp. 694-699 (1976).

- [Raibert81a] Raibert M.H. and Craig J.J. *Hibrid Position - Force Control Conference in Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* Vol. 102 pp. 126-133 (June 1981).
- [Salisbury] Salisbury J.K. *Active Stiffness Control of a manipulator in cartesian Coordinates in Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control* pp. 95-100. (1980).
- [Shimano78a] Shimano B. and Roth B. *On Force Sensing Information and its Use in Controlling Manipulators in Proceeding of the 8th Industrial Symposium on Industrial Robots* pp. 119-126, Washington D.C. (1978).
- [Simons85a] Simons J. and Van.brussel H. *Force Control Schemes for Robot Assembly in Robotic Assembly* pp. 253-265, ed. IFS (Publications) Ltd. U.K. Springer - Verlag Prof. Keith Rathmill (1985).
- [Stepien85a] Stepien T.M., Sweep L.M., Good M.C. and Tomikuza M. *Control of Tool / Workpiece Contact Force with Application to Robotic Deburring in Proceeding of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 670-679, S. Louis, USA., USA. (March 1982).
- [Whitney77a] Whitney D. *Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions in Transactions of ASME, Journal of Dynamic, Systems, Measurement and Control* pp. 91-97 (June 1977).
- [Whitney79a] Whitney D. and Nevins J. *What is the Remote Center Compliance (RCC) and what can it do? in Proceedings of the 9th International Symposium on Industrial Robots* pp. 135-152, Washington D.C., USA. (March 1979).
- [Whitney82a] Whitney D. *Quasi - Static Assembly of compliantly Supported Rigid Parts in ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* (104), pp. 65-77 (March 1982).
- [Whitney85a] Whitney D. *Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control in Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 262-268, S. Louis, USA (1985)

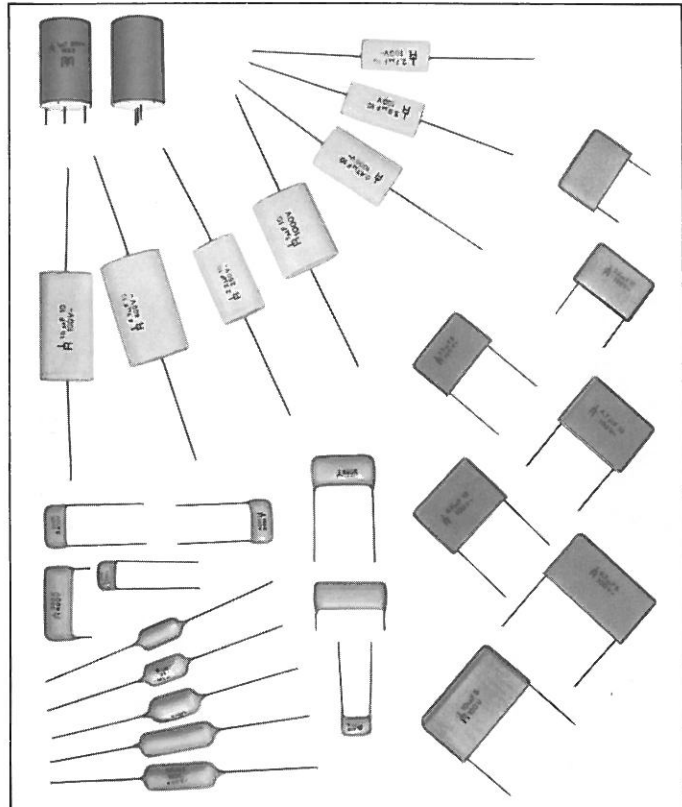


### Indicadores y controladores para pequeños caudales



Tipo KSV

- Campos de medición estandar.  
Agua: 0,1 – 1,5 l/h.  
hasta 5 – 80 l/h  
Aire: 10 – 80 l/h hasta  
0,2 – 2,6 Nm<sup>3</sup>/h
- Campos de medición especiales bajo demanda.
- Materiales
  - Policarbonato.
  - Polisulfon.
- Resistente a temperatura hasta 120° C
- Resistente a ácidos y lejías
- Contactos sin tensión
- Punto mínimo de conexión a 0,1 l/h de aire  
1 cm<sup>3</sup>/h agua
- Con o sin válvula de agua
- Económico



**CONDENSADORES**  
POLYESTER - POLYESTER METALIZADO  
POLIPROPILENO - ANTIPARASITOS



Teodoro Llorente, 14 int. E      Teléfono 235 60 84      BARCELONA-26

**mas nieto**

**MAS NIETO S.A.**  
08034 BARCELONA      Gran Via Carlos III, 140  
T (93) 203 27 08 - Telex 53986 - Telefax (93) 204 58 53  
28008 MADRID      Quintana, 23      Teléfono (91) 241 93 67