

## INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ DEL SISTEMA Y LA FRECUENCIA DE CORRECCIONES EN EL CONTROL DE FUERZAS DE ROBOTS INDUSTRIALES

Victor Liste y Mauricio Anigstein

*Laboratorio de Robótica. Facultad de Ingeniería,  
Universidad de Buenos Aires. Paseo Colón 850 (1063)  
Buenos Aires, Argentina. [vlste@fi.uba.ar](mailto:vlste@fi.uba.ar),  
[manigst@fi.uba.ar](mailto:manigst@fi.uba.ar)*

**Resumen:** Se aborda el problema de la implementación de control de fuerzas en robots industriales originalmente controlados por posición. La rigidez del conjunto medio-robot durante el contacto y la frecuencia con que puede corregirse la trayectoria cartesiana, condicionan fuertemente el ajuste de las ganancias del lazo de fuerzas y consecuentemente el comportamiento del sistema. Se estudian estos aspectos, analizando mediante simulación resultados experimentales previamente obtenidos con un robot industrial de última generación equipado con un sensor de fuerza/par en su muñeca. *Copyright © 2007 CEA-IFAC*

**Palabras clave:** manipulador robótico, control de fuerzas, rigidez del sistema, frecuencia de correcciones.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control de los robots industriales están basados en control de posición. Asumen que la herramienta se mueve sin contacto con el medio. Sin embargo, en el caso más general y sobre todo cuando el ambiente en el que debe trabajar el robot presenta cierto grado de incerteza, la interacción con el medio no puede despreciarse. En consecuencia, la búsqueda de mayor flexibilidad en las aplicaciones ha motivado desde hace años esfuerzos de investigación dedicados a mejorar las cualidades de los controladores robóticos, con la incorporación de sensores de fuerza/par.

El término control de fuerzas o control con acomodamiento, se refiere a tareas en las que existe un contacto continuo entre el robot y el medio, y en las que durante su ejecución la trayectoria de la herramienta es modificada debido a las

fuerzas de contacto que se producen (De Schutter and Van Brussel, 1988). Hay una amplia variedad de operaciones de manufactura en las que esta capacidad es importante. Algunos ejemplos: desbarbado, pulido, agujereado, montaje, movimientos cooperativos de dos o más robots sujetando un mismo objeto, y en general cualquier tarea durante la que exista contacto entre el robot y el medio. Las publicaciones en este área, aunque abundantes, mencionan en general trabajos desarrollados en ambientes de laboratorio, o en robots industriales pero con controladores especialmente diseñados y los resultados entonces no son directamente trasladables al ámbito industrial con los robots disponibles. Todo sistema robótico que debe controlar fuerzas requiere manejar dos aspectos: (i) especificación de la tarea o programación, (ii) ejecución de la tarea o control. El programa debe permitir describir la tarea como una se-

cuencia de comandos de alto nivel, que puedan ser automáticamente transformados en comandos de bajo nivel para controlar el movimiento del robot. Este aspecto utiliza como herramienta clave la *terna de acomodamiento*. La metodología fue desarrollada en una serie de publicaciones fundamentales (Paul, 1981; Mason, 1982; Craig, 1986), y como menciona Brady (1999), posteriormente extendida y refinada especialmente por Joris De Schutter y colegas (De Schutter and Van Brussel, 1988; Brunyninckx and De Schutter, 1996). Es una técnica bastante intuitiva e independiente de la estrategia particular de control. Permite definir las restricciones de movimiento y especificar las fuerzas deseadas compatibles con esas restricciones, en un sistema de coordenadas referido a la terna de acomodamiento, que resulta definida por las condiciones de vínculo de la tarea. El segundo aspecto se refiere a la estrategia de control, que acepta la anterior descripción como entrada. Debe permitir controlar fuerzas en algunas direcciones y desplazamientos (velocidades) en las otras direcciones de la terna de acomodamiento. Varios métodos han sido propuestos y tratados en referencias clásicas. El método del eje libre de Paul (1972), es uno de los primeros. Por cada dirección de la terna de acomodamiento en que se requiere controlar fuerza, elige un único actuador y una única componente de la fuerza medida para armar un lazo de control. Los actuadores remanentes quedan con los lazos de control de posición. Raibert y Craig (1981), proponen un control híbrido posición-fuerza que es una extensión y mejora del de Paul, aunque requiere más capacidad de cómputo en tiempo real. Dos conjuntos complementarios y paralelos de lazos de realimentación (de posición y fuerza) controlan al manipulador en contacto con el medio. Cada dirección de la terna de acomodamiento es controlada por un sólo lazo, mientras que ambos conjuntos de lazos intervienen en el control de cada eje del manipulador. El control de rigidez de Salisbury (1980), utiliza una matriz de realimentación para transformar las fuerzas/pares medidos en un vector de corrección de la posición deseada. En cambio, el control de amortiguación de Whitney (1977), utiliza la matriz de realimentación para corregir las velocidades cartesianas. El control de impedancia de Hogan (1985), propone regular la impedancia mecánica que modela la interacción del manipulador con el medio, y es una generalización de los dos anteriores.

Aunque pueden parecer diferentes, los métodos mencionados pueden ser configurados para proporcionar resultados similares (Whitney, 1987). Por otro lado, a pesar de la variedad de métodos existentes, queda mucho por hacer en control de fuerzas. Según Jörg *et al.* (2000), los sensores de fuerza/par montados en la muñeca de un robot

eran una excepción limitada al campo de la investigación científica, y la situación no ha cambiado mucho desde entonces.

### 1.1 Objetivo del presente trabajo

Se abordarán temas que afectan en general el comportamiento de un sistema de control de fuerzas cualquiera sea la estrategia particular que utilice, y que son relevantes no sólo para el diseño del control de fuerzas sino también para la selección del robot industrial sobre el que se implementará ese control. En artículos anteriores (Liste y Anigstein, 2004a, 2004b) se describieron comandos desarrollados y se presentaron resultados obtenidos con un sistema de control de fuerzas, implementado sobre un robot industrial de última generación: el IRB 140 con controlador *S4Cplus M2000* de ABB, con un sensor de fuerza/par de 6 direcciones ATI SI-65-5 montado en la muñeca y conectado al controlador del robot a través de una interfaz analógica. Los comandos se implementaron en el controlador del robot en el lenguaje Rapid del mismo y en Matlab sobre una PC externa, y pueden interactuar en tiempo real via Ethernet mediante un protocolo RPC/RAP (Roaux *et al.*, 2003). En los trabajos mencionados, se compararon respuestas del sistema modificando ganancias y velocidad de desplazamiento mientras se controlaba fuerza. Como el comportamiento del sistema está fuertemente condicionado por la frecuencia de correcciones a la trayectoria cartesiana, para compensar la muy baja frecuencia permitida por el controlador industrial, se desarrollaron funciones para reducir la constante elástica del sistema, implementando la idea del eje libre de Paul (1981), con la función *SoftServo* del lenguaje del robot. Sin embargo, este agregado no produjo las mejoras esperadas. El objetivo del artículo es analizar estos temas. Para ensayar condiciones de operación no logrables con el robot industrial (alta frecuencia de correcciones, distinta estrategia para el *SoftServo*), y por otro lado justificar comportamientos observados, se trabajará mediante simulación sobre un manipulador muy simple pero suficiente para mostrar resultados significativos.

### 1.2 Organización del artículo.

A continuación se presentan, la estrategia de control de fuerzas implementada en el robot industrial y dos ejemplos clásicos de aplicación. En la sección 3, se analiza primero el tema de la constante elástica del sistema asociado a la selección de las ganancias del control de fuerzas. Posteriormente, se muestran resultados no deseados al tratar de reducir esa constante para mejorar el comportamiento del control de fuerzas, durante

una tarea tipo realizada con el robot industrial. En la sección 4, se estudia mediante simulación una tarea similar y se comparan resultados variando la frecuencia de correcciones y la metodología para ajustar la constante elástica del sistema. Finalmente, se resumen y comentan estos resultados.

## 2. CONTROL DE FUERZAS

Los sistemas de control de los robots industriales son cerrados, no permiten acceder al código de los algoritmos y están basados en un control de posición que utiliza la conocida estrategia de *par computado* o *linealización exacta* (Craig, 1986). Linealiza la planta por realimentación mediante un modelo dinámico del manipulador y para la nueva entrada,  $\mathbf{v}$ , que debe estabilizar la planta transformada, utiliza una estrategia PID con información de las posiciones y velocidades medidas y deseadas, y aceleraciones deseadas de los ejes:

$$\mathbf{v} = \ddot{\theta}^d + \mathbf{g}\mathbf{d}(\dot{\theta}^d - \dot{\theta}) + \mathbf{g}\mathbf{p}(\theta^d - \theta) + \mathbf{g}\mathbf{i} \int_0^t (\theta^d - \theta) dt \quad (1)$$

Si se intenta desviar al robot de su trayectoria mediante la aplicación de fuerzas externas, el control incrementa la acción de los actuadores tratando de mantener la trayectoria. Cuando la acción requerida supera un umbral de seguridad, el controlador detiene el movimiento. Sin embargo, el controlador dispone de comandos para corregir en tiempo real los movimientos cartesianos deseados del robot. Estos comandos son los que permiten, utilizando información de sensores de fuerza/par, crear una estructura de control de fuerzas alrededor del lazo de control de posición original del robot. En la figura 1 puede verse el esquema de control implementado en el robot industrial (Liste y Anigstein, 2004a).  $\mathbf{J}$  es la matriz jacobiana del brazo y  $\mathbf{x}_s$  es la posición del medio. El esquema se asemeja al control de rigidez propuesto por Salisbury (1980). Utiliza una matriz de *acomodamiento*,  $\mathbf{G} = \text{diag}[g_1, \dots, g_6]$ , para transformar el error de fuerzas  $\delta\mathbf{F} = \mathbf{F} - \mathbf{F}^d$ , en un vector  $\delta\mathbf{x}^d$  que corrige en tiempo real las referencias de posición

$$\delta\mathbf{x}^d = \mathbf{G} \delta\mathbf{F} \quad (2)$$

Los  $g_i$ , cumplen la función de ganancias en la ley de control de fuerzas. Pero además, la estrategia implementada intenta mejorar las características de rigidez (acomodamiento) del sistema, modificando las ganancias del control de posición.

El controlador *S4Cplus* posee un módulo de Movimientos Avanzados que permite realizar correcciones sobre la trayectoria cartesiana a través de las funciones *CorrCon* y *CorrWrite*, mediante

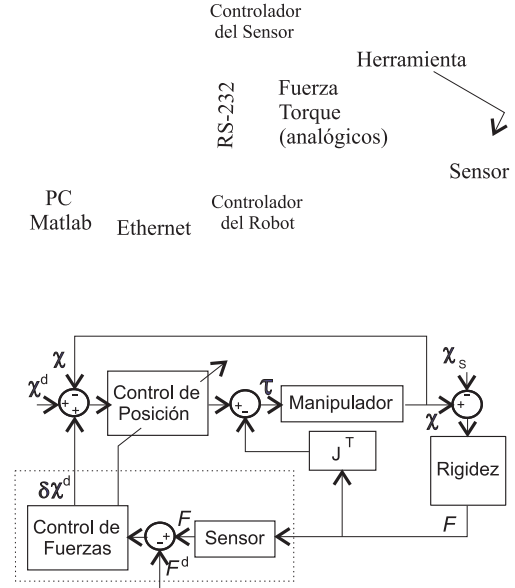


Figura 1. Esquema de control.

la ejecución de una interrupción cíclica cuya frecuencia máxima es de  $4Hz$ . Sin embargo, sólo permite realizar correcciones en dos direcciones de traslación y no permite corregir la orientación (corrige sólo dos de los seis grados de libertad). En consecuencia, para poder abordar tareas generales de control de fuerzas fue necesario desarrollar un nuevo paquete de algoritmos (Brumovsky *et al.*, 2006), que reemplazara al módulo de Movimientos Avanzados del robot. Como en el mismo deben utilizarse los comandos básicos del lenguaje del robot, una desventaja es que la frecuencia de correcciones debió bajarse a  $2Hz$ .

### 2.1 Dos ejemplos clásicos de aplicación

La función básica de las tareas con control de fuerzas, es el movimiento lineal con *objetivos* en posición-fuerza y con condiciones de *terminación*. En los movimientos lineales sin cambio de orientación, las mediciones con el sensor de fuerzas se realizan fuera de las zonas de aceleración para evitar que los efectos dinámicos se sumen a las fuerzas de contacto. Pero cuando hay reorientación durante el movimiento esto no es suficiente. Inevitablemente, las mediciones del sensor incluirán, además de las fuerzas de contacto, los esfuerzos estáticos provocados por el cambio de orientación de la herramienta. Es necesario entonces realizar una identificación previa de la masa y del momento de primer orden de la herramienta, para compensar el efecto mencionado durante el movimiento. Se desarrolló un procedimiento que aprovecha el mismo sensor de fuerzas y utiliza tres orientaciones distintas ((a),(b),(c) en la Fig. 2) de la herramienta montada en el robot.

Figura 2. Identificación de una herramienta.

Figura 5. Seguimiento y reorientación.

Figura 3. Secuencia de búsqueda e inserción.

Figura 4. Fuerza y correcciones en la búsqueda.

*Inserción de un perno en un agujero.* El robot debe insertar un perno en un agujero con chanfle, existente en una mesa cuya posición y orientación conoce con incerteza. En la figura 3, la imagen izquierda muestra al robot al iniciar la primera subtask: el movimiento de búsqueda en el que son argumentos la velocidad de avance y la fuerza umbral para la detención por choque. Encontrada la superficie, la segunda subtask hace una primera identificación de la dirección normal a la misma, y de la constante elástica del sistema que se utiliza para definir la ganancia inicial del lazo de fuerza para los movimientos que siguen (la imagen (a) muestra el final de esta subtask). Sigue luego un patrón de búsqueda (imagen (b)) que contiene una serie de movimientos lineales sin cambiar de orientación, mientras controla fuerza en la dirección normal estimada. La condición de terminación, agujero encontrado, se fija con un umbral de desplazamiento en la dirección normal. Además, en cada movimiento lineal, utilizando los datos de corrección de la trayectoria se obtiene una mejor identificación de la normal. La figura 4 muestra los resultados de la búsqueda para una  $f_z^d = -1$  Kgf. En el gráfico superior se indica la fuerza real aplicada en la dirección normal, y sobre la

Figura 6. Fuerza y reorientación en el seguimiento.

finalización de cada tramo del patrón de búsqueda se indica el error entre la normal identificada en dicho tramo y un valor de referencia obtenido a partir de la medición de tres puntos de la superficie. Puede verse la evolución del error a partir de los  $2.5^\circ$  obtenidos en la segunda subtask. En el gráfico inferior se indica la corrección acumulada durante la búsqueda. Nótese el incremento brusco, condición de terminación, al detectar el agujero (también la caída en  $f_z$ ). Encontrado el agujero se reorienta el perno (imagen (c)). Luego se realiza la inserción del perno (imagen (d)), controlando fuerzas y pares en dos direcciones normales al eje del agujero. La condición de terminación, fondo encontrado, se fija con un umbral de fuerza en la dirección del eje del perno.

*Seguimiento del contorno de una superficie.* El robot debe desplazarse sobre una superficie desconocida, manteniendo la herramienta (que tiene una bola patín en el extremo para hacer despreciable la fuerza de rozamiento), siempre normal a la misma (Fig. 5). No hay condición de terminación. La tarea finaliza al cumplirse el desplazamiento programado. En la figura 6, el gráfico superior muestra la fuerza de contacto durante el seguimiento (la herramienta nunca se separa de la superficie) y el inferior permite ver la evolución en la reorientación de la herramienta.

### 3. RIGIDEZ DEL SISTEMA

Es la resultante de todos los elementos que intervienen en el contacto (brazo, estrategia de con-

Figura 7. Modelización de una superficie sometida a una fuerza externa.

trol, sensor de fuerzas, herramienta, medio). A las bajas velocidades típicas de los movimientos con acomodamiento, la dinámica es usualmente ignorada en las fuerzas debidas al contacto y se supone comportamiento elástico en el mismo (Whitney, 1987; De Schutter, 1987).

### 3.1 Constante elástica del medio, $k_s$ .

Si el robot está en contacto con el medio ejerciendo una fuerza  $F$  (ver esquema en la Fig. 7), la deformación del medio,  $s$ , en la dirección de la fuerza y la fuerza satisfacen

$$s = F/k_s \quad (3)$$

En este punto y en adelante, por razones de simplicidad pero sin pérdida de generalidad, nos referimos siempre a deformaciones lineales y consecuentemente a las fuerzas que las provocan. Sin embargo, un análisis similar puede hacerse con deformaciones angulares y pares.

### 3.2 Constante elástica del manipulador, $k_r$ .

Incluye al brazo, estrategia de control, sensor, herramienta. En ausencia de fuerzas externas, si la estrategia de control compensa exactamente los efectos dinámicos y de rozamiento, la posición objetivo  $p_o$ , la posición medida  $p_m$  (con información de los encoders/resolvers) y la posición alcanzada  $p_a$  coincidirán. Se suponen en este análisis despreciables los errores debidos a la calibración del robot y a su deformación por efectos dinámicos. En cambio, el robot sometido a una fuerza externa, por ej. por el contacto con un obstáculo (ver esquema en la Fig. 8), no alcanzará la posición objetivo. La constante elástica del robot,  $k_r$ , es

$$k_r = F/r \quad ; \quad r = r_{con} + r_{est} \quad (4)$$

donde  $r_{con}$  depende de la estrategia de control de posición y  $r_{est}$  de la deformación del brazo, sensor y herramienta. Si el control de posición incluye

Figura 8. Modelización del robot sometido a una fuerza externa.

acción integral,  $p_m \rightarrow p_o$  y por lo tanto  $r_{con} \rightarrow 0$  ( $k_{con} \rightarrow \infty$ ). En general

$$r_{con} = F/k_{con} \quad ; \quad r_{est} = F/k_{est} \quad (5)$$

$$k_r = \frac{F}{r_{con} + r_{est}} = \frac{k_{con}k_{est}}{k_{con} + k_{est}} = k_{con} // k_{est} \quad (6)$$

### 3.3 Constante elástica del sistema, $k_{sist}$ .

Si con  $p_s$  se indica la posición de la superficie descargada,  $r + s$  es la distancia entre  $p_o$  y  $p_s$  proyectada en la dirección de la fuerza, y define

$$k_{sist} = \frac{F}{r + s} = k_r // k_s = k_{con} // k_{est} // k_s \quad (7)$$

Obsérvese que cuando  $F$  difiere del valor deseado, una forma de corregirla es modificando  $p_o$  en la dirección de la fuerza, suponiendo que no cambia  $p_s$ . Entonces es  $\delta p_o = \delta r + \delta s$ , y

$$k_{sist} = \delta F / \delta p_o \quad (8)$$

Como resulta inmediatamente de la Ec. 8, es importante notar que  $k_{sist}$  puede medirse (estimarse) en forma muy simple, utilizando información del robot y del sensor de fuerza/par. Por el mismo motivo, su valor puede ir ajustándose en tiempo real durante el movimiento en contacto.

### 3.4 Ganancias $g_i$ del lazo de control de fuerzas

El conocimiento de  $k_{sist}$  es muy útil para el control. Permite estimar la corrección que debe aplicarse en la trayectoria objetivo, a partir del error en la fuerza. Comparando las Ecs. (2) y (8) para una determinada dirección cartesiana, es inmediato inferir que una buena decisión es hacer para esa dirección (Craig, 1986; De Schutter, 1987)

$$g = k_{sist}^{-1} \quad (9)$$

Figura 9. IRB 140 en la tarea ensayo.

### 3.5 Parámetros que afectan a $\delta F$

Si se considera un sistema donde el robot debe ejercer una fuerza  $F$  sobre una superficie mientras se mueve a velocidad  $v$  en una dirección tangente estimada, la variación esperable  $\delta F$  en la fuerza ejercida al transcurrir un intervalo  $\delta t$ , puede calcularse según (Liste y Anigstein, 2004a)

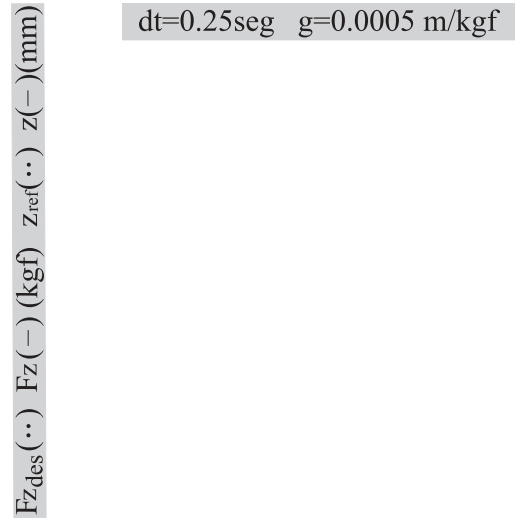
$$\delta F = tg(\alpha) v \delta t (k_r / k_s) \quad (10)$$

donde  $\alpha$  es el error en la estimación de la tangente. La Ec. (10) resume información útil para mejorar el desempeño del lazo de fuerzas, es decir reducir  $\delta F$ : disminuir  $k_r$  con una herramienta especial que provea acomodamiento (bajar  $k_{est}$ ) o reducir  $k_{con}$  mediante la estrategia de control de posición; utilizar superficies más blandas (menor  $k_s$ ); reducir el intervalo  $\delta t$  entre correcciones a la trayectoria; bajar la velocidad  $v$ ; conocer mejor (identificar) la orientación de la superficie (reducir  $\alpha$ ).

### 3.6 Un intento de reducir $\delta F$ utilizando *SoftServo*.

Se ensayará una tarea muy simple, en la que el robot desliza 0.2m una herramienta con rozamiento despreciable, sobre un plano cuya orientación conoce con una pequeña incerteza ( $\alpha = 10$  grados), mientras controla fuerza ( $F_{des} = 2Kgf$ ) en la dirección normal al mismo. La figura 9 muestra al robot durante la tarea. El robot mueve sólo sus ejes 2, 3 y 5 para desplazarse sobre una línea y mantener la orientación de la herramienta.

Se prueba una velocidad de desplazamiento elevada (5mm/seg), comparada con las velocidades desarrolladas en los ejemplos de la sección 2.1. Como contrapartida, se utiliza una superficie más blanda. En aquellos ejemplos era  $k_{sist} \simeq 10kgf/mm$ , con control integral en todos los ejes, es decir sin utilizar *SoftServo*. En este ensayo en cambio, la constante elástica del sistema que se mide como se indica en la sección 3.3, resulta de 2kgf/mm. En consecuencia, la ganancia del lazo externo de fuerzas se elige  $g = k_{sist}^{-1} =$

Figura 10. Tarea ensayo sin *SoftServo*.

0.5mm/Kgf (sección 3.4). Por otro lado, se fija  $\alpha$  de manera que  $F$  tienda a aumentar a medida que el robot se desplaza. Se ensayan tres alternativas.

**Lazo de fuerza sin *SoftServo*.** En la Fig. 10 puede verse la evolución de la fuerza de contacto cuando la estrategia de control no hace uso del *SoftServo*. La fuerza media efectivamente aplicada resulta aprox. 2.5kgf y las variaciones alcanzan 0.75kgf.

Si para una aplicación particular esta respuesta se considera no aceptable y no es posible aumentar la frecuencia de correcciones, una solución es disminuir  $k_{sist}$ , reduciendo  $k_{con}$ . El método, propuesto en la bibliografía ('Realimentación implícita de fuerza' (Whitney, 1987), 'Acomodamiento ablandando las ganancias de posición' (Craig, 1986)) se implementa a continuación.

**Lazo de fuerza con *SoftServo*.** En este caso se utiliza la idea del eje libre de Paul con la función *SoftServo* del lenguaje del robot. Esta función permite aflojar uno o más ejes, que se comportan como si estuvieran soportados por un resorte de constante ajustable.

Se cambia el material de la base en que apoya el plano, para que la constante elástica del sistema aumente a 5kgf/mm y fijando en el eje 2 del robot un nivel de 30 para el *SoftServo*, se logra reducir  $k_{sist}$  nuevamente a 2kgf/mm. La evolución de la fuerza de contacto se muestra en la Fig. 11. Como puede verse, el comportamiento del control desmejora. Las variaciones en la fuerza aplicada superan los 3kgf y el sistema tiende a ser inestable.

***SoftServo* en ausencia de fuerzas externas.** La estrategia del *SoftServo* debe deshabilitar el control integral del eje a aflojar (en el ensayo el eje 2), para permitir errores en el seguimiento de la trayectoria sin que la protección detenga los motores (sección 2). Pero además, según el manual del Rapid (ABB Robotics, 2001), el eje

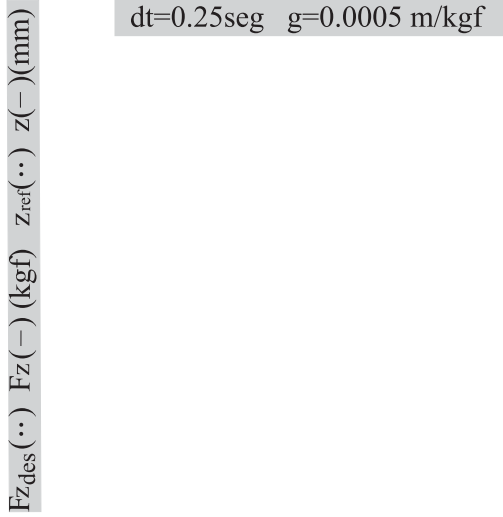
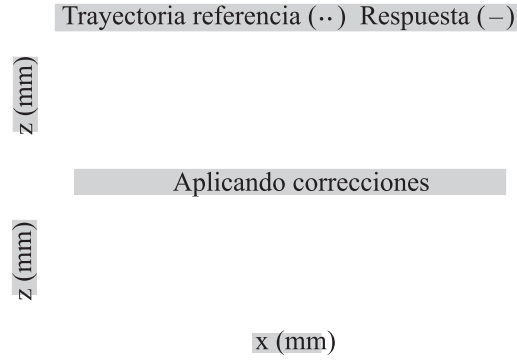
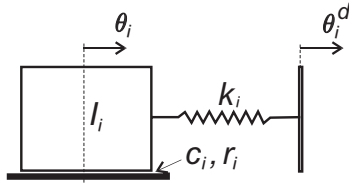
Figura 11. Tarea ensayo con *SoftServo*.Figura 12. Tarea ensayo con *SoftServo* y sin fuerzas externas.

Figura 13. Esquema dinámico del eje con soft-servo.

debería comportarse como si estuviera soportado por un resorte cuya posición de equilibrio en cada instante (sin fuerza externa), fuera la posición deseada. Sin embargo, el ensayo que sigue muestra otra cosa. Se repite el movimiento anterior, con un nivel de 30 para el *SoftServo* en el eje 2, pero apartando el plano para eliminar la fuerza de contacto del robot con el medio. En la Fig. 12 se muestra: en el gráfico superior el error en el seguimiento de la trayectoria lineal de referencia; en el inferior, la respuesta lenta y con errores a correcciones de  $\pm 1\text{mm}$  respecto de la trayectoria.

La dinámica que se observa en el eje ablandado  $i$ , es la de un sistema masa-resorte con rozamiento viscoso y seco, como el esquematizado en la Fig. 13 (Liste y Anigstein, 2004a), donde las constantes  $I_i$ ,  $k_i$ ,  $c_i$ ,  $r_i$ , definen la *inercia* y los coeficientes

elástico, de rozamiento viscoso y seco respectivamente, que permiten modelar el comportamiento del eje. Utilizando niveles de ablande superiores a los del ensayo, el comportamiento empeora rápidamente y el eje con *SoftServo* puede dejar de moverse, debido no sólo al incremento de la inercia sino también de los rozamientos. La nueva entrada a la planta linealizada, para el control de posición que *afloja* el eje  $i$ , resulta

$$v_i = \frac{k_i}{I_i} (\theta_i^d - \theta_i) - \frac{c_i}{I_i} \dot{\theta}_i - \frac{r_i}{I_i} \text{sgn}(\dot{\theta}_i) \quad (11)$$

Obsérvese que es natural que el mal comportamiento del control de posición degrade el desempeño del control de fuerzas: *aún si la ubicación de la superficie fuera perfectamente conocida, la fuerza sufrirá variaciones debido a que el control de posición no sigue la trayectoria objetivo*.

#### 4. SIMULACIONES

A continuación, para ensayar condiciones de operación no logrables con el robot industrial (alta frecuencia de correcciones, distinta estrategia para el *SoftServo*), y por otro lado justificar el comportamiento observado, se trabajará mediante simulación sobre un manipulador muy simple pero suficiente para mostrar resultados significativos. Se simulará el comportamiento de un robot plano con dos ejes de rotación (que corresponderían a los ejes 2 y 3 del IRB 140), largo de eslabones  $a_1 = a_2 = 0.4\text{m}$ , y parámetros dinámicos conocidos por el control. Se ensayará una tarea como la descrita en la sección 3.6. Se utilizará la estrategia de control definida en la sección 2. Opcionalmente se *ablandará* el eje del robot que mejor acomoda en la dirección normal a la superficie.

##### 4.1 Tarea propuesta

El robot se encuentra en  $(x = 0.3\text{m}; y = -0.4\text{m})$  ejerciendo fuerza contra una superficie plana (ver Fig. 14). La normal a la superficie forma un ángulo  $\alpha = 10\text{grados}$  con la dirección  $y$ , desconocido por el control. Se desea desplazar el manipulador en la dirección  $x$  a una velocidad de  $20\text{ mm/seg}$  hasta la coordenada  $x = 0.5\text{m}$ . En la dirección  $y$  controlada por fuerza se desea que la misma mantenga un valor  $F^d = 2\text{kgf}$ . La superficie es modelizada inicialmente con  $k_s = 4\text{kgf/mm}$ .

##### 4.2 Control de posición

Mediante linealización exacta se linealiza la planta y desacopla cada eje y con lazos PID se controla posición. Además, se puede proveer acomodamiento en la dirección  $y$  de control de fuerza:



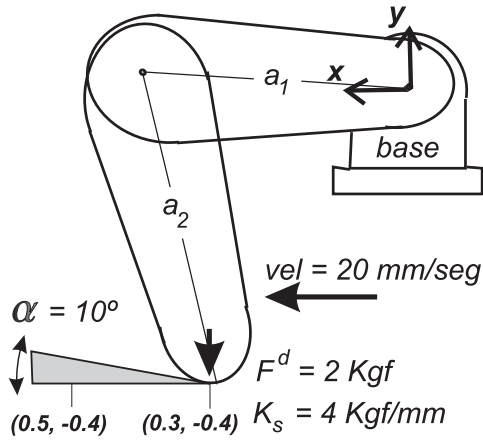


Figura 14. Tarea a simular.

ablandando, es decir, eliminando el control integral y bajando las ganancias PD del eje adecuado, el que posee un mayor coeficiente de mérito en la dirección  $y$  (Paul, 1981). En la tarea que se definió, estos coeficiente varían entre: eje 1  $[0.7443...1.2610]$ , eje 2  $[0.2557... - 0.2610]$ , por lo que el eje 1 se utilizará para acomodar en la dirección  $y$ . El eje 2 se controla PID (Ec. (1)) con ganancias:  $gd_2 = 310^2 \text{seg}^{-1}$ ,  $gp_2 = 310^4 \text{seg}^{-2}$ ,  $gi_2 = 10^6 \text{seg}^{-3}$ . Para el eje 1 se ensayarán distintas estrategias de control, útiles para modificar la constante elástica del sistema.

#### 4.3 Constante elástica del robot $k_r$

Elegida  $k_s$  queda por definir  $k_r$  para obtener  $k_{sist}$ . En las simulaciones se supondrá al robot sin deformaciones, y por lo tanto  $k_r \equiv k_{con}$ . Las ecuaciones dinámicas de la planta y del control mediante linealización exacta, son (Craig, 1986)

$$\tau_{cont} + \mathbf{J}^T(\theta) \mathbf{F} = \mathbf{M}(\theta) \ddot{\theta} + \mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) \quad (12)$$

$$\tau_{cont} = \mathbf{M}_c(\theta) \mathbf{v} + \mathbf{h}_c(\theta, \dot{\theta}) \quad (13)$$

Suponiendo que la planta es conocida exactamente ( $\mathbf{M}(\theta) = \mathbf{M}_c(\theta)$ ;  $\mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) = \mathbf{h}_c(\theta, \dot{\theta})$ ), en estado estacionario se obtiene

$$\mathbf{M}(\theta) \mathbf{v} = -\mathbf{J}^T(\theta) \mathbf{F} \quad (14)$$

y reemplazando la Ec. (1) en la (14)

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} gp_1 e_1 + gi_1 \int_0^t e_1 dt \\ gp_2 e_2 + gi_2 \int_0^t e_2 dt \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} j_{11} & j_{21} \\ j_{12} & j_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (15)$$

La relación entre  $F$  y el desvío de la trayectoria en la dirección de  $F$  (en estado estacionario), define

$k_{con}$ . Sólo será  $k_{con} \neq \infty$  si no se utiliza acción integral en algún eje. En el caso de *ablandar* el eje 1, haciendo  $gi_1 = 0$  en la Ec. (15), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} gp_1 e_1 \\ gi_2 \int_0^t e_2 dt \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} j_{11} & j_{21} \\ j_{12} & j_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (16)$$

Si sólo hay fuerza externa en la dirección  $y$ , de la Ec. (16) resulta

$$e_1 = \frac{F_y}{gp_1} \frac{j_{22}m_{12} - j_{21}m_{22}}{\det(\mathbf{M})} \quad (17)$$

Ahora puede calcularse el desplazamiento cartesiano del robot respecto de la posición objetivo. Utilizando la matriz jacobiana, y asumiendo que  $e_2 = 0$  por utilizar control PID en el eje 2, se obtiene

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} \\ j_{21} & j_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11}e_1 \\ j_{21}e_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Finalmente, utilizando las Ecs. (17) y (18) resulta la constante elástica del robot en la dirección  $y$ :

$$k_{con_y} = \frac{F_y}{e_y} = gp_1 \frac{\det(\mathbf{M})}{j_{21}j_{22}m_{12} - j_{21}^2m_{22}} \quad (19)$$

$$k_{sist} = k_s // k_{con_y} \quad (20)$$

#### 4.4 Estudio comparativo de casos seleccionados

Como puede verse en el diagrama de la Fig. 15, en el control básico de posición de la planta se toman muestras y se controla en forma discreta con una frecuencia de  $1 \text{KHz}$ , mientras en el lazo externo de fuerzas la frecuencia de correcciones dependerá del caso a simular. En el bloque de linealización exacta los parámetros dinámicos utilizados fueron los mismos de la planta. Se procedió de esta manera, porque debido a la robustez de la estrategia de linealización, agregar incertezas elevadas (errores del 20%, 30% o más en los mismos) no generaba modificaciones significativas en la respuesta, frente a las importantes variaciones que si provocaban los cambios en la rigidez del sistema y en la frecuencia de correcciones.

A continuación, se analizará el desempeño del sistema variando la frecuencia de correcciones a la trayectoria en el lazo externo de fuerzas, y variando  $k_{sist}$  de dos maneras: modificando el control de posición (*ablandando* el eje 1) y luego *ablandando* la superficie.

Eje 1 sin ablandar. En este caso se controla el eje 1 de la misma manera que el eje 2.



F

Figura 15. Diagrama en bloques del sistema.

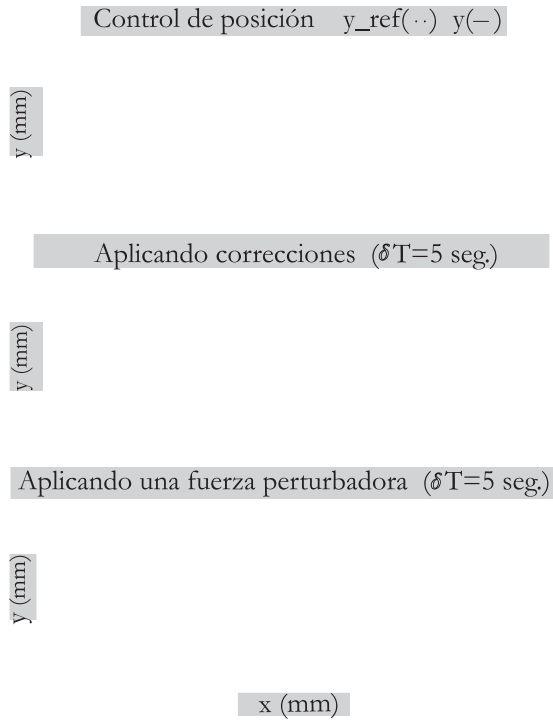


Figura 16. Control de posición con eje 1 sin ablandar.

*Sin contacto con la superficie.* Se busca que el robot siga fielmente la trayectoria objetivo y rechace fuerzas externas. En la figura 16 se muestra el resultado de simulaciones en las siguientes condiciones: (i) sin fuerzas externas y sin correcciones a la trayectoria; (ii) sin fuerzas externas y aplicando como corrección a la trayectoria una onda cuadrada de amplitud  $2mm$ . y frecuencia  $0.2Hz$ ; (iii) aplicando como fuerza externa perturbadora una onda cuadrada de amplitud  $2Kgf$

y frecuencia  $0.2Hz$ . Se observa que el seguimiento de la trayectoria es muy preciso (error  $\ll 0.1mm$ ), la respuesta a las correcciones es muy rápida ( $\sim 3ms$ ), y las fuerzas externas son rechazadas por el control integral.

*Control de fuerzas.* La constante elástica del sistema en la dirección  $y$  es impuesta por la superficie, ya que el robot posee acción integral. Por lo tanto  $k_{sist} = 4kgf/mm$ . La ganancia del control de fuerzas se elige entonces (sección 3.4),  $g = k_{sist}^{-1} = 0.25mm/kgf$ . Se realizaron simulaciones con períodos de corrección a la trayectoria de  $0.5$  y  $0.005$  seg. La Ec. (10) predice que la variación de la fuerza entre correcciones será de  $7$  kgf y  $0.07$  kgf respectivamente. Las simulaciones brindaron resultados muy cercanos a las previsiones (Figs. 17 y 18). Para  $0.005$  seg el sistema se comporta de manera robusta y predecible. Para  $0.5$  seg la fuerza oscila entre valores muy elevados y cero (se pierde el contacto), indicando que la herramienta golpea y rebota contra la superficie. Para evitar este comportamiento no aceptable cuando no es posible aumentar la frecuencia de correcciones, se ensaya disminuir  $k_{sist}$  reduciendo  $k_{con}$ , y utilizando una estrategia similar a la función *SoftServo* del robot (sección 3.6).

*Eje 1 blando con SoftServo simulado.* En el eje 1 se elimina el control integral, y además la velocidad y aceleración deseadas en el lazo de posición. La dinámica resultante en la dirección ablandada es ahora similar a la proporcionada por la Ec. (11), sistema masa-resorte con rozamiento viscoso pero sin rozamiento seco. Para reducir  $k_{sist}$ , el robot debe ser más blando que la superficie. Se elige  $gp_1$  para que  $k_{con} = k_{sup}/10$ . Utilizando

Figura 17. Eje 1 sin ablandar. Control de fuerzas con  $\delta t = 0.5 \text{ seg}$ .

Figura 19. Eje 1 blando con *SoftServo*. Sin contacto con la superficie.

Figura 18. Eje 1 sin ablandar. Control de fuerzas con  $\delta t = 0.005 \text{ seg}$ .

la Ec. (19), si se elige  $gp_1 = 28 \text{ seg}^{-2}$  (y  $gd_1 = 10.6 \text{ seg}^{-1}$  para amortiguamiento crítico) resulta  $k_{con} = 0.4 \text{ kgf/mm}$  en el punto medio y valores cercanos en el resto de la trayectoria.

*Sin contacto con la superficie.* Se simularon dos casos (Fig. 19): (i) control de posición sin correcciones (ni fuerzas externas); (ii) con correcciones oscilatorias de intervalo  $\delta T = 5 \text{ seg}$ . Se observa que el control de posición tiene un muy mal desempeño. Los errores en la trayectoria son de 4 a 6 mm. La respuesta a las correcciones es lenta  $\sim 0.5 \text{ seg}$ . Estos resultados repiten el comportamiento observado en el robot industrial. También, el mal desempeño del control de posición degradará el control de fuerzas, como se confirma a continuación.

*Control de fuerzas.* La máxima ganancia del control de fuerzas es:  $g = k_{sist}^{-1} = 2.5 \text{ mm/kgf}$ . Se simuló (Fig. 20) con 2 mm/kgf y  $\delta t = 0.5 \text{ seg}$ . Como se observa, el comportamiento del control

Figura 20. Control de fuerzas. Eje 1 blando con *SoftServo*.  $\delta t = 0.5 \text{ seg}$ .

de fuerzas no es aceptable. La fuerza de contacto oscila entre valores  $\geq 5 \times F^d$  y 0 (pérdida de contacto).

Eje 1 blando con *SoftServo mejorado*. Para ablandar el eje 1, pero sin desmejorar tanto la respuesta dinámica, se realimenta el *error* en velocidad (Craig, 1986):

$$v_1 = gp_1 (\theta_1^d - \theta_1) + gd_1 (\dot{\theta}_1^d - \dot{\theta}_1) \quad (21)$$

Las ganancias  $gp_1$  y  $gd_1$  son elegidas con los mismos valores de la estrategia anterior para lograr  $k_{con} = 0.4 \text{ kgf/mm}$ .

*Sin contacto con la superficie.* Con la nueva estrategia de control se repiten los dos casos de la Fig. 7. Ahora, se observa que el error máximo en el seguimiento de la trayectoria desciende aproximadamente 10 veces (Fig. 21).

Figura 21. Eje 1 blando con *SoftServo* mejorado.  
Sin contacto con la superficie.

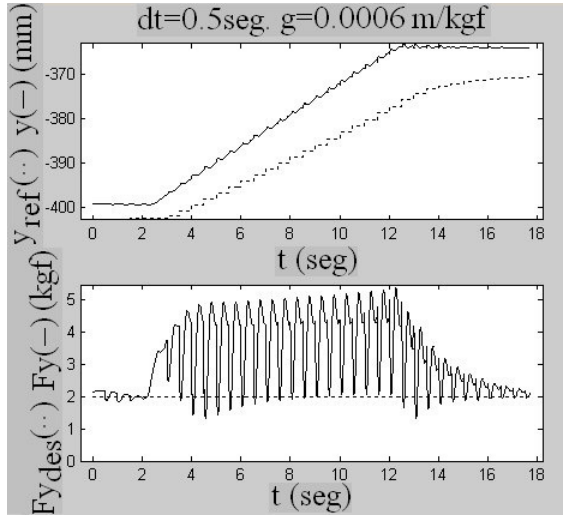


Figura 22. Control de fuerzas. Eje 1 blando,  
*SoftServo* mejorado,  $\delta t = 0.5\text{seg}$ . y  $g$   
reducida experimentalmente.

*Control de fuerzas.* Aunque la mejora anterior es un resultado positivo, comportamientos aceptables en el lazo externo de control de fuerzas sólo se logran si puede bajarse  $\delta t$  y además a expensas de reducir las ganancias. En las figuras 22 y 23 se observa el desempeño del sistema con  $\delta t = 0.5\text{seg}$  y  $0.005\text{seg}$ , y con las ganancias del lazo externo de control de fuerzas disminuidas mediante prueba y error hasta hacer al sistema estable.

*Ablandando la superficie.* Como se vió, disminuir la constante elástica *ablandando* el control de posición cuando la superficie de contacto es *dura*, puede ser una solución aceptable en algunas aplicaciones, pero no resuelve el problema en forma general. La dinámica se hace más lenta (menor ancho de banda) y por lo tanto el problema tampoco puede remediarse reduciendo arbitrariamente  $\delta t$ . En cambio, ablandar la superficie siempre proporcionará una mejor contribución a la mejora

Figura 23. Control de fuerzas. Eje 1 blando, *SoftServo* mejorado,  $\delta t = 0.005\text{seg}$ . y  $g$  reducida experimentalmente.

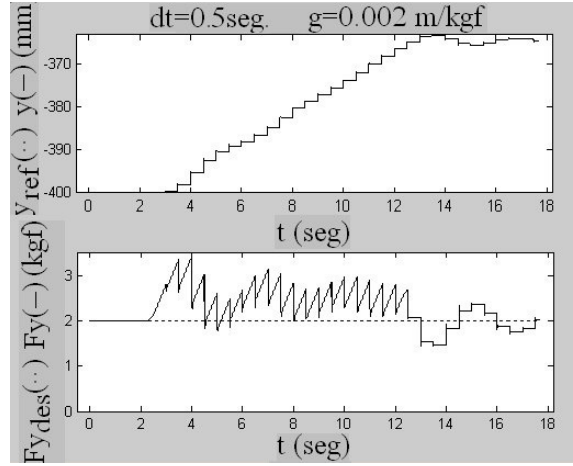


Figura 24. Control de fuerzas. Superficie blanda y eje 1 sin ablandar,  $\delta t = 0.5\text{seg}$ .

de calidad del control de fuerzas. Un efecto equivalente lo puede brindar una herramienta especial que provea acomodamiento pasivo reduciendo  $k_{est}$ , sin afectar las ganancias del control de posición (Whitney, 1987). En las Figs. 24 y 25 puede verse el desempeño del sistema con la superficie 10 veces más blanda,  $k_s = 0.4\text{kgf/mm}$ , control integral en ambos ejes y la ganancia ajustada según el valor teórico  $g = k_s^{-1}$ . Como siempre, la frecuencia de correcciones influye decisivamente.

## 5. CONCLUSIONES

Se discutieron conceptos relacionados con la constante elástica del sistema,  $k_{sist}$ , y el error esperable en la fuerza aplicada. Se mostró cómo esa constante, de importancia clave en el comportamiento de un sistema de control de fuerzas, puede medirse en forma muy simple en tiempo

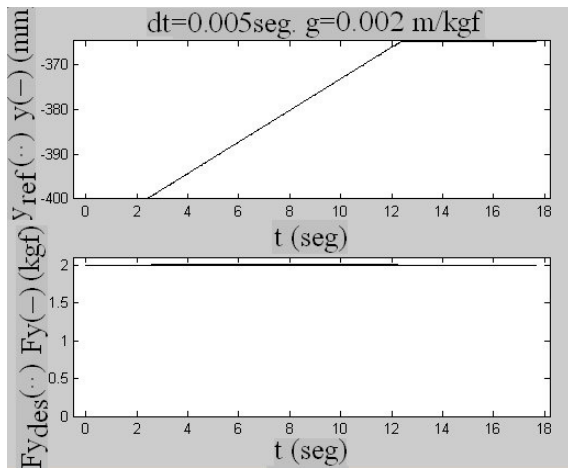


Figura 25. Control de fuerzas. Superficie blanda y eje 1 sin ablandar,  $\delta t = 0.005 \text{ seg}$ .

real utilizando información del robot y del sensor de fuerza/par. Fue utilizada en los ejemplos con el robot industrial y en las simulaciones, para calcular la ganancia del lazo externo de control de fuerzas. Un resultado original en este tema es la Ec. (19) que permite calcular la constante elástica del robot debida al control,  $k_{con}$ , en una dirección determinada, cuando se utiliza un eje para brindar acomodamiento en esa dirección.

Las simulaciones, aunque realizadas sobre un modelo simple, permitieron repetir el comportamiento observado en un robot industrial e ilustrar las previsiones teóricas. Frecuencias bajas para corregir la trayectoria limitan y desmejoran decisivamente la calidad del control de fuerzas. Utilizar la estrategia de control para brindar acomodamiento en los ejes del robot (reducir  $k_{sist}$  disminuyendo  $k_{con}$ ) puede no mejorar suficientemente el comportamiento, y puede desmejorarlo si la estrategia no es correcta (*SoftServo*).

Finalmente, el acomodamiento pasivo generado mediante algún dispositivo especial en la herramienta o *ablandando* la superficie, produce resultados positivos en cualquier caso y puede ser necesario según la aplicación, cuando la frecuencia de correcciones a la trayectoria permitida por el controlador es baja.

## REFERENCIAS

- ABB Robotics (2001). *RAPID, System Data Types, Instructions and Functions*. BaseWare OS 4.0, Sweden.
- Brady, M. (1999). Preface to the Millennium Special Issue. *Int J Robot Res* **18**(11), Editorial.
- Brumovsky, A.F., Liste, V.M. y M. Anigstein (2006). Implementación de Control de Fuerzas en Robots Industriales: Un Caso. *IV Jornadas Argentinas de Robótica*. ID #008-JAR06. Córdoba, Argentina.

- Brunyninckx, H. and J. De Schutter (1996). Specification of Force-Controlled Actions in the "Task Frame Formalism" - A Synthesis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **12**(4), 581-589.
- Craig, J.J. (1986). *Introduction to Robotics, Mechanics & Control*. Addison-Wesley, Mass.
- De Schutter, J. (1987). A Study of Active Compliant Motion Control Methods for Rigid Manipulators Based on a Generic Scheme. En: *IEEE Conf Robot Automat*, IEEE Computer Society Press. Washington. 1060-1065.
- De Schutter, J. and H. Van Brussel (1988). Compliant robot motion I. A formalism for specifying compliant motion tasks. *Int J Robot Res* **7**(4), 317.
- Hogan, N. (1985). Impedance control: An approach to manipulation. *ASME J Dynamic Syst Meas Cont*. **107**, 124.
- Jörg, S., J. Langwald, J. Stelter, G. Hirzinger and C. Natale (2000). Flexible robot-assembly using a multi-sensory approach. En: *Proc IEEE Int Conf Robot Automat*. 3687.3694.
- Liste, V. y M. Anigstein. (2004a). Sobre Control de Fuerza/Torque. *III Jornadas Argentinas de Robótica*, JAR426, San Juan, Argentina.
- Liste, V. y M. Anigstein. (2004b). Control de Fuerzas en Robots. Un Toolbox en Matlab. *XIX Congreso Argentino de Control Automático*, AADECA2004, ID #41, Buenos Aires.
- Mason, M. T. (1982). Compliant Motion. En: *Robot Motion Planning and Control*. Edited by M. Brady, J.M. Hollerbach, T.L. Johnson, T. Lozano-Pérez and M.T. Mason. Chapter 5. The MIT Press. Cambridge, Mass.
- Paul, R. P. (1972). *Modelling, trajectory calculation, and servoing of a computer controlled arm*. Technical report. Stanford University, Artificial Intelligence Laboratory.
- Paul, R.P.(1981). *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*. The MIT Press, Cambridge, Mass.
- Raibert, M. H. and J. J. Craig (1981). Hybrid position/ force control of manipulators. *ASME J Dynamic Syst Meas Cont*. **102**, 126133.
- Roaux, M., Ilardi P. y M. DAscanio (2003). *Desarrollo de interfaz Matlab/RAP para el controlador de ABB M2000*. Trab. Final de Taller de Prog. III y Robótica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
- Salisbury, J.K. (1980). Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates. En: *19th IEEE Conf Decision Cont*. Albuquerque, Nueva México.
- Whitney, D.E. (1977). Force feedback control of manipulator fine motions. *ASME J Dyn Sys Meas Contr*. June, 91-97.
- Whitney, D.E. (1987). Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control. *Int J Robot Res*, **6**(1), 3-14.