

CONTROL HÍBRIDO CON REORIENTACIÓN PARA TRAZADO DE FIGURAS EN SUPERFICIES 3D

Oscar Reinoso, Alejandro Filgueira, César Fernández, Luis M. Jiménez, Luis Payá
Dept. Ingeniería de Sistemas Industriales
Universidad Miguel Hernández de Elche
Avda. Universidad s/n
o.reinoso@umh.es

Resumen

En este artículo se presentan los resultados alcanzados como consecuencia de realizar un control híbrido sobre un robot articular, con objeto de realizar trazados sobre superficies tridimensionales. La alternativa propuesta se basa en realizar un control en diferentes capas asegurando que el elemento trazador se encuentre siempre en perpendicular con la superficie a dibujar y mantenga con respecto a ésta una determinada fuerza de contacto. De esta forma se integran sobre el esquema de control las fuerzas y pares recogidas por un sensor de esfuerzos en el extremo del robot.

Palabras clave: Control híbrido, sensor de esfuerzos, control de fuerzas

1 INTRODUCCIÓN

Para que un robot serial articulado lleve a cabo tareas de dibujo o trazado sobre cualquier tipo de superficie es necesario que se produzca y mantenga un contacto entre el elemento trazador y la superficie de dibujo. Este contacto produce sobre ambos elementos (robot y entorno) fuerzas y momentos de contacto.

Las estrategias de control basadas únicamente en el control posicional del extremo del robot no pueden resolver satisfactoriamente este tipo de situaciones de contacto con el entorno, ya que en estos casos las fuerzas y momentos externos no son debidos exclusivamente a la gravedad y a la inercia. Tan solo en situaciones de contacto en las que las características estáticas y dinámicas del entorno y del manipulador sean perfectamente conocidas en cada instante puede emplearse con éxito un control posicional.

Como alternativa a los controles de posición para la resolución de este tipo de problemas surgen a finales de los 70 estrategias basadas en el control de esfuerzos [9]. La obtención de los esfuerzos de contacto generados durante la interacción robot-entorno supone la principal problemática del control de esfuerzos.

Algunas técnicas emplean sensores de esfuerzos para realizar medidas de las fuerzas y momentos generados durante el contacto (direct force control strategies). De entre éstas destacan el Control Híbrido posición/fuerza o velocidad/fuerza, descrito por primera vez por Raibert y Craig a finales de los 70 en [3] y tratado posteriormente en [1, 6]; y el Control Paralelo, de más reciente aparición [2].

Existen otras técnicas que no necesitan del uso de sensores de esfuerzos (aunque pueden emplearlos para obtener medidas de esfuerzos que permitan linealizar y desacoplar la dinámica del extremo del robot durante el contacto): son las denominadas técnicas de control indirecto de los esfuerzos (indirect force control strategies). Los dos controles más importantes dentro de este grupo son: el Control de Rigidez, que fue el primero de los controles de esfuerzos descritos [8]; y el Control de Impedancia, una ampliación del anterior propuesto por primera vez a mediados de los 80 por Hogan en [5] y tratada posteriormente en [7].

El presente artículo describe una estrategia de control de esfuerzos directa, en la que se emplea un sensor de esfuerzos. Este sensor realiza medidas de fuerza y momento existentes en el extremo del robot, información que debe ser interpretada previamente a su empleo como entrada al algoritmo de control. Los esfuerzos medidos por el sensor están compuestos por esfuerzos de diversa naturaleza, parte de los cuales no son debidos al contacto.

Para que la tarea de pintado sobre superficies curvas se pueda realizar eficazmente, el elemento trazador situado en el extremo del robot debe ser orientado de forma que permanezca en todo momento lo más perpendicular a la superficie de dibujo que se pueda. Con este fin se expone a lo largo de este texto el mecanismo de reorientación ideado que se basa en los esfuerzos de contacto para conseguir el trazado de trayectorias bajo situaciones de contacto robot-entorno.

La estrategia de control que se presenta en este artículo es mixta, ya que combina algunas de las técnicas ya existentes para poder conseguir que el

manipulador robótico realice con éxito la tarea de pintado. El control consta de un movimiento acomodaticio que reorienta el extremo del robot y de un control híbrido fuerza/velocidad que controla la fuerza normal de contacto con la superficie de dibujo y la realización de la trayectoria sobre la superficie. El control de fuerza implementado incluido en el control híbrido incluye tres variantes distintas: control PID clásico, control PI con prealimentación y estimación off-line de la rigidez del contacto y control PI con prealimentación y estimación on-line de la rigidez del contacto.

En la sección 2 se expone la arquitectura del sistema de control, el sistema físico a controlar y los elementos sensores empleados. La sección 3 describe el objetivo del control realizado así como los esquemas de control y estrategias empleados. En la sección 4 se exponen los experimentos llevados y los resultados obtenidos en los mismos. Por último la sección 5 contiene las conclusiones extraídas. En [4] se desarrolla con mayor profundidad todos los temas recogidos a lo largo de este texto.

2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La arquitectura del sistema creado está compuesta por cuatro elementos básicos:

- Sistema físico a controlar: robot serial articulado.
- Dispositivos sensores: encoders de posición internos del robot, sensor de esfuerzos.
- Sistema de control: dos PC's, controladora de ejes del robot, tarjeta de interfaz entre la controladora y los PC's.
- Elemento trazador: pinza y rotulador situados en el extremo final del robot serial.

El sistema físico que se pretende controlar es un robot articular de 7 g.d.l. modelo Mitsubishi PA-10. Este manipulador está gobernado mediante una arquitectura propia de control, constituida por una controladora de ejes, una tarjeta programadora y una librería de funciones de alto nivel escritas en lenguaje de programación C (*PA Libray*).

Los encoders de posición angular internos del robot pueden ser consultados a través de funciones de la citada librería. El sensor de esfuerzos es un modelo 67M25A-I40 de la marca JR3. Los esfuerzos y demás parámetros medidos por este dispositivo pueden consultarse y configurarse gracias

a la tarjeta DSP conectada de una parte al sensor y de otra a un PC. La comunicación entre la aplicación de control y el sensor se completa mediante un driver proporcionado por Norberto Pires¹ y una librería de funciones desarrollada y escrita en C (*SensorJR3*). Previamente a la puesta en funcionamiento del sensor de esfuerzos dentro del esquema de control planteado es necesario llevar a cabo un proceso de calibración del mismo.

El control diseñado tiene como misión establecer un contacto regulado entre el rotulador y el entorno, permitiendo a la vez que se produzca un movimiento relativo en el plano tangente al rotulador y la superficie de contacto.

Se han empleado dos PCs para implementar el sistema de control diseñado. La comunicación entre ambos equipos se lleva a cabo mediante un enlace RPC. Uno de los PCs está directamente conectado a la arquitectura de control del robot mediante una tarjeta CPU conectada físicamente a su bus ISA. Este equipo actúa como servidor de la comunicación establecida mediante el enlace RPC: recibe peticiones de control que le llegan desde el PC cliente y las ejecuta sobre el robot. El PC cliente realiza la comunicación con el sensor de esfuerzos (a través de la tarjeta DSP conectada a su bus ISA), e implementa la aplicación de control. El PC cliente envía peticiones de servicios al PC servidor para que éste último ejecute los correspondiente comandos de movimiento sobre el robot.

La comunicación RPC se ha establecido empleando la librería de enlace dinámico Distinct RPC/XDR-32. En la figura 1 se observa la disposición e interacción de los distintos dispositivos que componen el sistema de control.

3 ESQUEMAS DE CONTROL IMPLEMENTADOS

La tarea de pintado que el sistema robótico debe llevar a cabo consiste en describir con su extremo una trayectoria bidimensional durante el contacto con el entorno al mismo tiempo que realiza un control de fuerza tridimensional, controlando las fuerzas a lo largo de los tres ejes de coordenadas de su extremo, generadas como fruto de su interacción con el entorno. Es decir, el objetivo del control es fijar la posición del punto de contacto del rotulador de forma que describa una determinada trayectoria (dibujando sobre la superficie de contacto) a la vez que se regulan las fuerzas de contacto ejercidas sobre el entorno (con el fin de

¹<http://robotics.dem.uc.pt/norberto/>

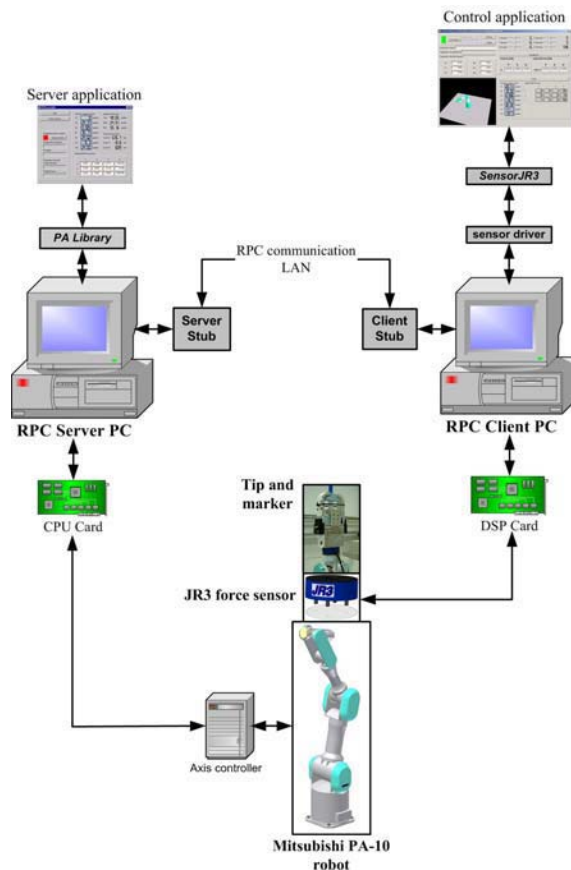


Figura 1: Arquitectura del sistema

preservar la integridad tanto del entorno como del rotulador y del robot).

Para resolver el problema del control de fuerzas se puede plantear un control tridimensional de fuerzas empleando cualquiera de las técnicas de control de esfuerzos que relacionan los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del extremo del robot en cada dirección del espacio con las fuerzas existentes en esas mismas direcciones (control PI, control PD, control de impedancia, [5], control de rigidez, [8]).

Sin embargo, en algunas situaciones, dependiendo de la estructura del entorno, el control de fuerzas puede no ser suficiente, y puede ser necesario que el extremo del robot se reoriente para acomodar su orientación a la superficie de contacto y de esa forma conseguir una interacción más “cómoda”. La figura 2 muestra un ejemplo de una situación en la que se hace necesaria una reorientación del rotulador. En esta situación, para dibujar una línea horizontal sobre la esfera, no basta con controlar la fuerza sobre el rotulador y la posición del extremo del robot: es necesario reorientar el rotulador para que éste se mantenga normal a la superficie de contacto en todo momento.

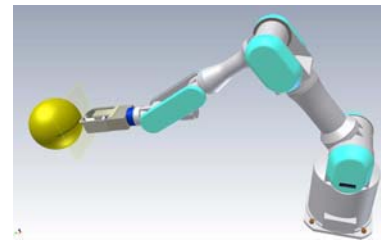


Figura 2: Situación en la que se hace necesaria la reorientación del extremo del robot.

La estrategia de control adoptada reemplaza el control tridimensional de fuerzas por un control unidimensional de fuerza combinado con un control de los pares de contacto generados durante la interacción con el entorno. El control de los momentos de contacto genera un movimiento acomodaticio que reorienta el extremo del robot. La reorientación se realiza para alinear el eje Z del extremo del robot con la recta normal a la superficie de contacto en el punto de contacto. De este modo toda la fuerza normal de contacto se refleja en el citado eje Z. El control unidimensional de fuerza a lo largo del eje Z del extremo del robot se encarga de regular la fuerza normal de contacto entre el trazador y el entorno. A estos dos tipos de control, dirigidos a mantener las condiciones de contacto óptimas entre el rotulador y el entorno, se une un control de posición que se encarga de proporcionar las referencias de posición necesarias para que el rotulador describa la trayectoria bidimensional deseada.

Cuando el rotulador está perfectamente alineado con la dirección normal a la superficie de contacto en el punto de contacto, la situación se puede asimilar a la del *Control Híbrido*, en el que las restricciones artificiales (grados de libertad a controlar) son las siguientes:

- El plano tangente a la superficie de contacto contiene las direcciones con restricciones artificiales de posición, que permiten que el rotulador describa la trayectoria bidimensional que compone el dibujo. Las restricciones artificiales de posición son las coordenadas X e Y del punto de contacto del rotulador con el entorno expresadas en el sistema de referencia de contacto con el entorno: X_{en} e Y_{en} .
- La dirección normal a la superficie de contacto en el punto de contacto contiene la restricción artificial de fuerza, que permite controlar la presión ejercida por el rotulador sobre la pizarra. La restricción artificial de fuerza es la fuerza medida a lo largo del eje Z del sistema de referencia del entorno: ${}^{en}f_{comp}^z$.

El sistema de referencia ortonormal en el que se definen las diversas restricciones es móvil, y coincide en todo instante con el sistema de referencia del entorno en el punto de contacto (S_{en})².

El objetivo del movimiento de acomodación generado por el control de los pares de contacto es mantener, en todo momento, el extremo del robot en una situación en la que se pueda aplicar con éxito el *Control Híbrido*: para ello se hacen coincidir las coordenadas del sistema de referencia del punto de contacto (S_c) con las del sistema de referencia del entorno (S_{en}), que coincide siempre con el sistema de referencia asociado al *Control Híbrido*.

Una vez la situación de contacto es la descrita para el *Control Híbrido* (el rotulador se encuentra normal a la superficie con la cuál está interaccionando) el robot se controla empleando una estrategia de *Control Híbrido*, en la que los ejes X_c e Y_c son controlados en posición mientras que el eje Z_c se controla mediante el control de fuerzas. Cuando la orientación del rotulador no es la adecuada se abandona el *Control Híbrido* (el control de posición a lo largo de X_c e Y_c deja de llevarse a cabo) y se adopta un control combinado de fuerza y pares que permite reorientar el extremo del robot acomodando su orientación a la de la superficie de contacto.

La tabla 1 ilustra las entradas y salidas de cada uno de los controles implementados.

Control	Entrada	Salida
Fuerza	$\Delta^c f_{comp}^z$	$\Delta^c p_{des}^z$
Pares	$\Delta^e m_{comp}^x$ $\Delta^e m_{comp}^y$	$\Delta^c \theta_{des}^x$ $\Delta^c \theta_{des}^y$
Posición	$\Delta^c p_{ref}^x$ $\Delta^c p_{ref}^y$	$\Delta^c p_{des}^x$ $\Delta^c p_{des}^y$

Tabla 1: Entradas y salidas de cada tipo de control

La combinación de todas estas acciones de control da lugar a una acción de control global, con parte lineal ($\Delta^c p_{des}$) y parte angular ($\Delta^c \theta_{des}$). La parte lineal da lugar a posiciones del extremo del robot mientras que la angular da lugar a rotaciones del extremo del robot.

Para que el *Control Híbrido* se lleve a cabo únicamente cuando la situación de contacto es la adecuada se definen prioridades de funcionamiento para cada uno de los tres tipos de control (fuerza, pares y posición). Los controles que poseen mayor prioridad son los controles de fuerza y pares de contacto, que actúan de forma continua sobre el robot. Cuando la fuerza normal de contacto y los momentos de contacto están den-

²El cambio del punto de contacto entre el robot y el entorno modifica la situación y la orientación del sistema S_{en} .

tro de unos intervalos de aceptación el control de posición se activa y se describe la trayectoria bidimensional. Una vez la fuerza normal de contacto o los momentos de contacto se encuentran fuera de su intervalo de validez el control de posición se desactiva. Durante el control de posición bidimensional, tanto el control de fuerzas en el eje Z como el control de momentos siguen activos, con el fin de mantener un nivel constante y uniforme de interacción con la superficie de contacto. La existencia del control de la fuerza de contacto a lo largo del eje Z durante el control posicional puede provocar que la trayectoria descrita por el extremo del rotulador no sea exactamente bidimensional: el trazado sobre superficies tridimensionales da lugar a este fenómeno.

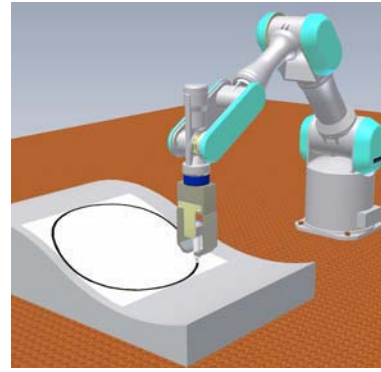


Figura 3: Descripción de una trayectoria bidimensional sobre una superficie tridimensional.

3.1 Control de pares

El objetivo del control de los pares de contacto es alinear el eje Z_c del sistema de referencia asociado al extremo del rotulador S_c con el eje Z_{en} del sistema asociado al entorno en el punto de contacto S_{en} . El eje Z_{en} se extiende a lo largo de la dirección normal a la superficie de contacto en el punto de contacto entre el rotulador y el entorno. El eje Z_c es solidario al extremo del rotulador, y se corresponde con el eje longitudinal del mismo.

Los pares de contacto permiten medir el grado de desalineación existente entre los ejes Z_c y Z_{en} . La relación entre los momentos de contacto y las fuerzas compensadas expresado por componentes:

$${}^e m^x = -{}^e p_c^z \cdot {}^c f_{comp}^y + {}^e p_c^y \cdot {}^c f_{comp}^z \quad (1)$$

$${}^e m^y = {}^e p_c^z \cdot {}^c f_{comp}^x - {}^e p_c^x \cdot {}^c f_{comp}^z \quad (2)$$

$${}^e m^z = -{}^e p_c^y \cdot {}^c f_{comp}^x + {}^e p_c^x \cdot {}^c f_{comp}^y \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que el trazador está centrado con respecto al extremo del robot (${}^e p_c^x = 0$, ${}^e p_c^y =$

0):

$${}^e m^x = -{}^e p_c^z \cdot {}^c f_{comp}^y + {}^e p_c^y \cdot {}^c f_{comp}^z \quad (4)$$

$${}^e m^y = {}^e p_c^z \cdot {}^c f_{comp}^x - {}^e p_c^x \cdot {}^c f_{comp}^z \quad (5)$$

$${}^e m^z = 0 \quad (6)$$

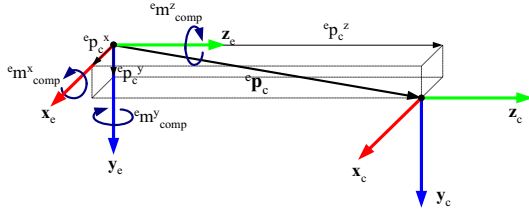


Figura 4: Caso general de cálculo de los momentos de contacto.

Cuando los ejes Z_c y Z_{en} se encuentran perfectamente alineados se cumple que $\mathbf{Z}_c \parallel \mathbf{Z}_{en}$ y por lo tanto ${}^c f_{comp}^z = |{}^c f_{comp}|$, lo que provoca que ${}^c f_{comp}^x = {}^c f_{comp}^y = 0$. Este hecho hace que los momentos de contacto tomen valores nulos. Caso contrario no se satisface esta restricción.

Para reducir al máximo el valor de los pares ${}^e m^x$ y ${}^e m^y$ se ha empleado un control PID clásico en el que la referencia es nula.

El control PID planteado toma como entrada el error de momentos dado por:

$$\Delta^e m = {}^e m_{ref} - {}^e m_{comp} = \begin{pmatrix} -{}^e m_{comp}^x \\ -{}^e m_{comp}^y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

A partir de éste se calcula el vector de ángulos relativos de giro ($\Delta^e \theta_{des}$) que debe describir el extremo del robot para conseguir alinear Z_c con Z_{en} . La siguiente ecuación muestra la expresión de cálculo del citado vector de ángulos relativos de giro:

$$\Delta^c \theta_{des} = k_{po} \Delta^e m + k_{io} \int_0^t \Delta^e m + k_{do} \frac{\partial \Delta^e m}{\partial t} \quad (8)$$

Los ángulos relativos de giro $\Delta^c \theta_{des}^x$ y $\Delta^c \theta_{des}^y$, generados son suministrados como referencia de entrada al control de orientación.

Los incrementos angulares que se comandan al control de orientación del robot deben realizarse empleando como punto de giro el punto de contacto en el que se sitúa el origen de S_c . El control de momentos realiza una rotación del extremo del robot en torno al punto de contacto S_c , de forma

que si este punto está mal calculado, el giro da lugar, bien a incrementos de la fuerza normal de contacto, bien a disminuciones drásticas de la misma.

En la figura 5 se representa el esquema de control PID de los momentos de contacto.

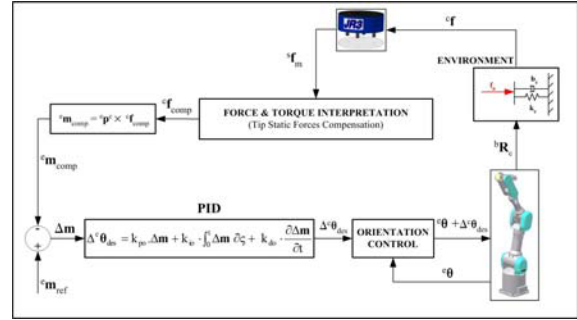


Figura 5: Esquema de control de los momentos de contacto con PID clásico.

3.2 Control de posición

Este control únicamente se lleva a cabo cuando el rotulador se encuentra correctamente orientado con respecto a la superficie de contacto y soportando una fuerza normal de contacto lo suficientemente próxima a la referencia deseada. En esta situación de contacto el robot está en disposición de describir la trayectoria bidimensional deseada sobre el entorno.

El control de posición toma las posiciones que le indica el planificador de trayectorias y las suministra al sistema de control del PA-10. Las referencias de posición suministradas por el planificador de trayectorias deben ser referencias incrementales relativas al sistema de referencia del punto de contacto: $\Delta^c p^x$ y $\Delta^c p^y$.

Cuando el control de posición actúa de forma simultánea al control de fuerza, la referencia deseada de posición que se comanda al sistema de control del PA-10 está compuesta por dos tipos de señales, la obtenida a partir del control de fuerzas y las obtenidas a partir del planificador de trayectorias.

3.3 Control de fuerza

El sistema de control de fuerzas planteado se basa en un bucle externo de control de fuerzas que proporciona referencias al bucle interno de posición o velocidad. De este modo el control de posición implementado en el sistema de control del PA-10 funciona supeditado al control de fuerza.

Se han empleado tres estrategias de control de fuerza para regular la fuerza normal de contacto existente entre el rotulador y el entorno:

- Control PID.
- Control PI con prealimentación y estimación off-line de la rigidez del contacto.

Estos dos esquemas de control tienen como objetivo regular la fuerza normal de contacto a un valor fijo en régimen permanente. Esto equivale a conseguir un error nulo con respecto a la fuerza deseada cuando la referencia de entrada es un escalón de fuerza.

Los dos controles que incorporan una prealimentación consiguen, además de la regulación de la fuerza normal de contacto, el seguimiento (*force tracking*) de la referencia deseada de fuerza.

3.3.1 Modelo del contacto

La fuerza normal de contacto generada en la interacción robot-entorno se modela mediante un sistema masa-muelle-amortiguador de segundo orden:

$$f_n = m \cdot (\ddot{x}_c - \ddot{x}_{en}) + b_c \cdot (\dot{x}_c - \dot{x}_{en}) + k_c \cdot (x_c - x_{en}) \quad (9)$$

Considerando que el entorno permanece estático ($\ddot{x}_{en} = 0$, $\dot{x}_{en} = 0$) se obtiene:

$$f_n = m \cdot \ddot{x}_c + b_c \cdot \dot{x}_c + k_c \cdot (x_c - x_{en}) \quad (10)$$

Este modelo completo del contacto se simplifica ante la imposibilidad de controlar conjuntamente la posición, la velocidad y la aceleración del extremo del robot sin disponer de su modelo dinámico y sin poder acceder al control directo de sus pares. El modelo de contacto considerado es puramente elástico, de forma que la fuerza normal de contacto generada durante la interacción rotulador-entorno responde a la siguiente ecuación:

$$f_n = k_c \cdot (x_c - x_{en}) \quad (11)$$

que puede reescribirse del siguiente modo:

$$x_c = k_c^{-1} \cdot f_n + x_{en} \quad (12)$$

donde x_c es la posición del punto extremo del trazador, x_{en} es la posición del punto del entorno indeformado en el que se produce el contacto y k_c es el coeficiente de rigidez del contacto trazador-entorno.

3.3.2 Comparación de los controles de fuerza

En las dos estrategias de control de fuerza planteadas se actúa sobre el error de fuerza (Δf_n)

existente entre la fuerza normal deseada ${}^c f_{ref}^z$ y la fuerza normal medida ${}^c f_{comp}^z$:

$$\Delta f_n = {}^c f_{ref}^z - {}^c f_{comp}^z \quad (13)$$

Los esquemas de control de los dos controles de fuerza se muestran en las figuras 6 y 7.

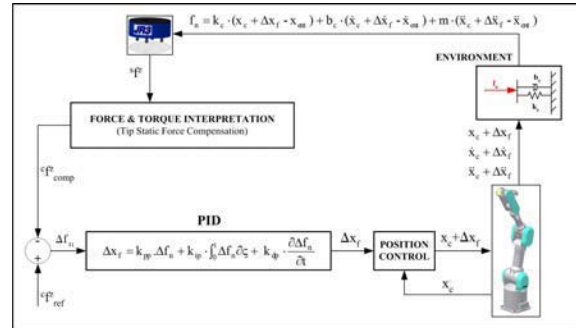


Figura 6: Esquema de control de la fuerza normal de contacto con PID.

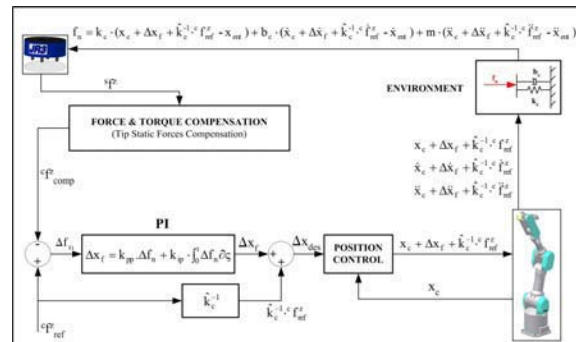


Figura 7: Esquema de control de la fuerza normal de contacto con PI con prealimentación y estimación off-line de la rigidez de contacto.

El error de fuerza Δf_n se emplea como entrada al control PID para dar lugar a un incremento de fuerza (positivo o negativo) que, en virtud del modelo de contacto simplificado, se convierte en una referencia de posición incremental (Δx_f). Esta referencia de posición, relativa a la posición actual del extremo del rotulador a lo largo de la dirección normal a la superficie de contacto, se suministra como entrada al control de posición implementado en la controladora del robot (ver figura 8).

$$\Delta x_{des} = \Delta x_f \quad (14)$$

La referencia de posición está expresada en el sistema de referencia del extremo del rotulador (S_c) y es un incremento de posición relativo a este punto extremo. En los controles con prealimentación a esta referencia de posición Δx_f se le añade un término de prealimentación obtenido mediante la referencia de fuerza normal deseada y la rigidez del contacto robot-entorno:

$$\Delta x_{des} = \Delta x_f + \hat{k}_c^{-1} \cdot f_{ref} \quad (15)$$

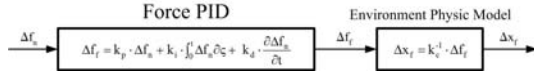


Figura 8: Control de la fuerza normal de contacto con PID de fuerza.

El control posicional se encarga de mover el extremo del rotulador de su posición actual x_c hasta una nueva posición relativa dada por el incremento Δx_{des} a lo largo de la normal a la superficie de contacto.

El cambio de posición del extremo del rotulador con respecto al entorno modifica la fuerza normal de contacto existente entre ambos cuerpos. La nueva fuerza se obtiene empleando el modelo de contacto dado en la ecuación 10 en la que la nueva posición del punto de contacto ya no es x_c sino $x_c + \Delta x_{des}$:

$$f_n = m \cdot (\ddot{x}_c + \Delta \ddot{x}_{des}) + b_c \cdot (\dot{x}_c + \Delta \dot{x}_{des}) + k_c \cdot (x_c + \Delta x_{des} - x_{en}) \quad (16)$$

3.3.3 Esquema global de control

Las leyes de control de fuerza, momento y posición dan como resultado referencias de posición u orientación relativas a la posición u orientación actuales del extremo del robot:

- El control de posición, sólo activo cuando la fuerza y los momentos de contacto se encuentran dentro de sus respectivos umbrales de validez, proporciona referencias de posición relativas al sistema de referencia S_c a lo largo de los ejes X_c e Y_c . Gracias a estas referencias $\Delta^c p_{des}^x$ y $\Delta^c p_{des}^y$, el rotulador describe una determinada trayectoria sobre el entorno.
- El control de fuerzas proporciona referencias de posición a lo largo del eje Z_c ($\Delta^c p_{des}^z$), con el fin de regular la fuerza normal de contacto.
- El control de pares de contacto proporciona incrementos angulares en torno a los ejes X_c e Y_c ($\Delta^c \theta_{des}^x$ y $\Delta^c \theta_{des}^y$) con el fin de reorientar el extremo del robot.

El algoritmo de control creado proporciona en cada instante de control las siguientes referencias al sistema de control del robot:

- El vector de velocidades lineales deseadas para el extremo del robot a lo largo de los tres ejes de coordenadas del sistema S_e : ${}^e \dot{\mathbf{p}}^{des}$

- El vector de velocidades angulares deseadas para el extremo del robot en torno a los tres ejes de coordenadas del sistema S_e : ${}^e \dot{\theta}^{des}$.

Las referencias incrementales de posición y orientación obtenidas mediante los controles de fuerza, pares y posición se convierten de forma directa en referencias de velocidad. Esto se consigue dividiéndolas entre el periodo existente entre intervalos de control. Es necesario medir este lapso de tiempo entre periodos para poder llevar a cabo el cálculo de ${}^e \dot{\mathbf{p}}^{des}$ y ${}^e \dot{\theta}^{des}$:

$${}^e \dot{\mathbf{p}}^{des} = \frac{\Delta^e \mathbf{p}^{des}}{T} \quad \left(\frac{mm}{s} \right) \quad (17)$$

$${}^c \dot{\theta}^{des} = \frac{\Delta^c \theta^{des}}{T} \quad \left(\frac{rad}{s} \right) \quad (18)$$

donde:

${}^e \dot{\mathbf{p}}^{des}$ es el vector de velocidades lineales deseadas para el extremo del robot. Está referido al sistema de referencia del extremo del robot. Es la referencia de entrada al sistema de control del robot.

$\Delta^e \mathbf{p}^{des}$ es el vector de posición incremental deseado medido desde el sistema de referencia del extremo del robot. Esta referencia es la calculada mediante el control de fuerzas y posición del algoritmo.

${}^c \dot{\theta}^{des}$ es el vector de velocidades angulares deseadas para el extremo del robot.

$\Delta^c \theta^{des}$ es el vector de giros incrementales referido al sistema S_c . Al realizar la traslación de S_e hasta $[S_c]$, estos giros incrementales pueden ser empleados directamente para la obtención de ${}^c \dot{\theta}^{des}$.

T es el intervalo de tiempo existente entre dos ejecuciones sucesivas del algoritmo de control.

En la figura 9 se muestra un flujograma completo del algoritmo que permite implementar el control en tiempo real proporcionando referencias de velocidad lineal y angular (sin emplear prealimentación).

4 EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

A continuación se van a presentar los resultados obtenidos cuando se implementan los dos tipos de control anteriormente referenciados en la sección 3.3.

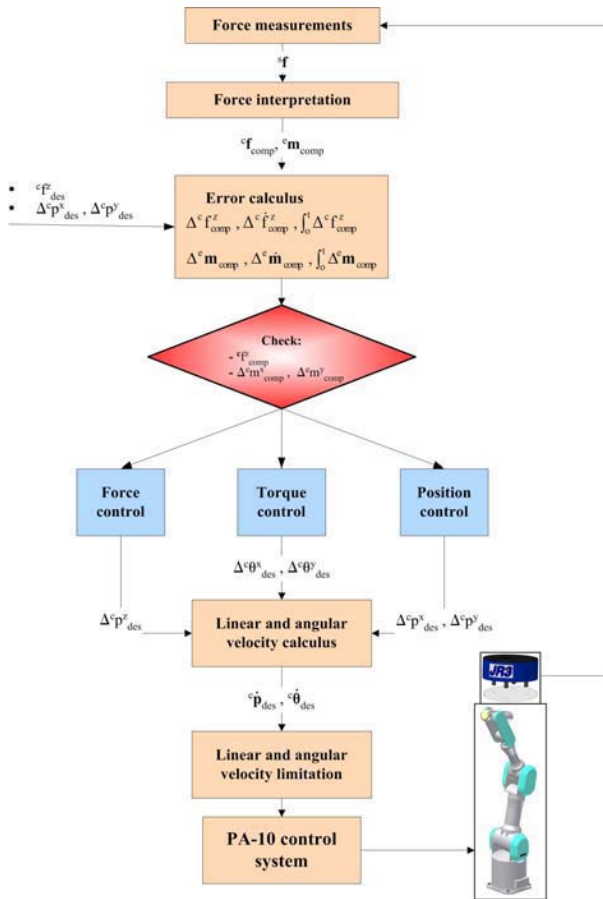


Figura 9: Flujoograma del algoritmo de control que emplea el control de velocidad en tiempo real (sin prealimentación).

La tarea desarrollada en los experimentos que se presentan a continuación consiste en dibujar un círculo sobre una superficie de contacto. Se sitúa el extremo del trazador en contacto con una superficie plana y alineado con su normal. El sistema desarrolla un control de fuerza a lo largo del eje Z_c . En el caso del control PI con prealimentación se ha probado con diversos valores de la estimación del coeficiente de rigidez (K_c^{-1}). En la figura 10 se presenta el control PID, mientras que en la figura 11 se observa el control PI con prealimentación siendo $K_c^{-1} = 0.02mm/N$.

Otro conjunto de experimentos planteado permite evidenciar la validez del sistema de control ante la interacción del trazador con superficies de contacto con diferente forma. Así se han considerado dos tipos de superficies diferentes: una plana y otra la envolvente de un cilindro. En las figura 12 se presenta la trayectoria seguida por el punto de contacto cuando la superficie es totalmente plana, mientras que en la figura 13 se observa la trayectoria cuando la superficie es la envolvente de un cilindro. En ambos casos el objetivo es trazar una circunferencia sobre esta superficie de contacto.

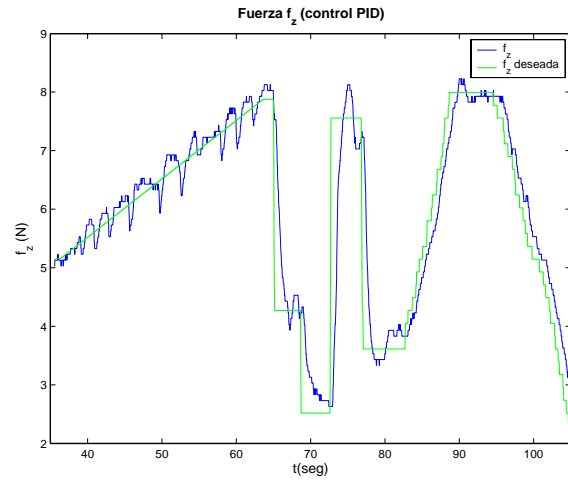


Figura 10: Control PID con seguimiento de fuerza.

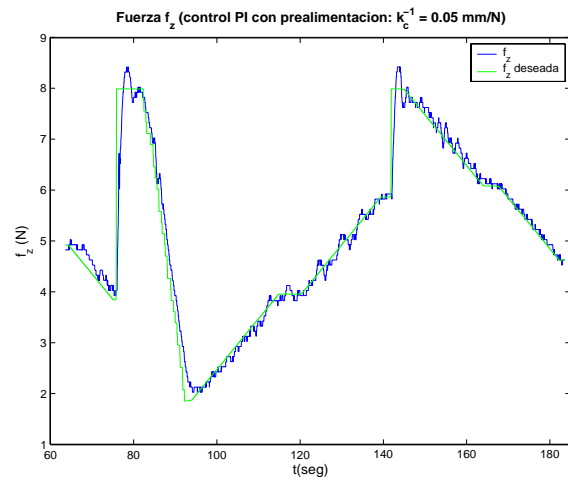


Figura 11: Control PI con prealimentación.

5 CONCLUSION

En este artículo se han presentado diferentes esquemas de control híbrido propuestos para posibilitar la ejecución de trazos de cualquier forma sobre diferentes superficies tridimensionales manteniendo en todo instante una orientación adecuada entre el elemento trazador y la superficie de contacto así como una determinada fuerza de contacto entre ambos elementos. Para ello se han propuesto un conjunto de esquemas de control en el que se reemplaza un control tridimensional de fuerzas por un control unidimensional en combinación con un control de pares de contacto generados durante la interacción entre ambas superficies. De esta manera se genera un movimiento acomodaticio que reorienta el elemento trazador sobre la superficie de contacto. Una vez que se dan las condiciones necesarias se realiza un control híbrido en la que los ejes del plano tangente a la superficie de contacto son controlados en posición mientras

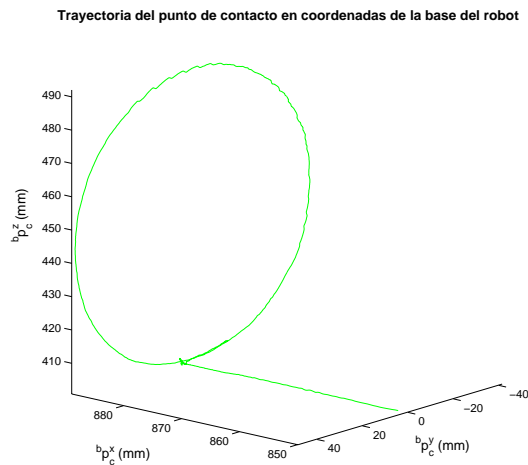


Figura 12: Trayectoria seguida por el extremo al trazar una circunferencia sobre una superficie plana.

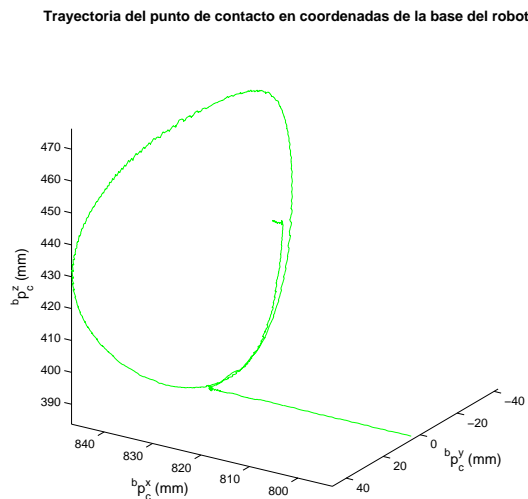


Figura 13: Trayectoria seguida por el extremo al trazar una circunferencia sobre una superficie cilíndrica.

que sobre el eje perpendicular a la superficie de contacto se realiza un control de fuerzas.

Los experimentos realizados permiten observar una adecuada capacidad de reorientar el extremo del robot de forma continua en función de los pares de contacto, manteniendo en todo momento la fuerza aplicada sobre la superficie de contacto por este elemento trazador, independientemente de la forma tridimensional de la superficie.

Referencias

[1] David J. Austin and Brenan J. McCarragher. Hybrid force/velocity discrete event controller synthesis for assembly tasks with friction. Technical report, Center of Autonomous Sys-

tems, Royal Institute of Tehcnology (Suecia) - Department of Engineering, Australian National University (Australia).

- [2] S. Chiaverini and L. Sciavicco. The parallel approach to force/position contro of robotic manipulators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 9, pages 361–373, 1993.
- [3] J. Craig and M. Raibert. A systematic method for hybrid position/force control of a manipulator. In *IEEE Computer Software Applications Conference*, Chicago, Nov 1979.
- [4] Alejandro Filgueira. Control de un robot articular en un entorno parcialmente estructurado mediante un sensor de esfuerzos. Master's thesis, Escuela Politécnica Superior de Elche (Universidad Miguel Hernández), Oct 2004.
- [5] N. Hogan. Impedance control: An approach to manipulation: Parts i-iii. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 107:1–24, 1985.
- [6] O. Khatib. A unified approach for motion and force control of robot manipulators. the operational space formulation. *IEEE Journal of Robots and Automation*, 3:43–53, 1987.
- [7] Ciro Natale, Luigi Villani, and Bruno Siciliano. Spatial impedance control of redundant manipulators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1788–1793, Detroit, MI, 1999. PRISMA Lab, Dipartimento di Informatica e Sistemistica, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- [8] R. Paul and B. Shimano. Compliance and control. In *Joint Automatic Control Conference*, pages 694–699, San Francisco, CA, 1976.
- [9] Richard Volpe and Pradeep Khosla. A theoretical and experimental investigation of explicit force control strategies for manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Noviembre 1993.

