

## ESTIMACIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO PARA EL CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES CON MOVIMIENTOS RESTRINGIDOS

Javier Gámez García,\* Anders Robertsson,\*\*  
Juan Gómez Ortega\* y Rolf Johansson.\*\*

\* Grupo de Robótica, Automática y Visión por Computador de la  
Universidad de Jaén, 23071 Jaén, España.

e-mail: {jggarcia, juango}@ujaen.es.

\*\* Departamento de Control Automático, Universidad de Lund,  
PO Box 118, SE-221 00 Lund, Suecia.

e-mail: {Anders.Robertsson, Rolf.Johansson}@control.lth.se.

**Resumen:** En aquellas operaciones robóticas en las que un robot manipulador interactúa con su entorno resulta de extrema importancia poder controlar la fuerza que aquél ejerce sobre este. Con este objetivo, se suele colocar habitualmente un sensor de fuerza en la muñeca del manipulador, cerrando de esta forma el lazo de control. En lo que se refiere a estos sensores, uno de los principales problemas que plantean es que sus medidas están influenciadas no sólo por las fuerzas de contacto, sino también por las fuerzas relacionadas con la dinámica de la herramienta del manipulador, es decir, las fuerzas de inercia. En este artículo se presenta un nuevo estimador de la fuerza de contacto consistente en la integración de la información de sensores de fuerza, posición y aceleración. Además, se describe un procedimiento de calibración automático ‘plug-and-play’ para la identificación y ajuste de los parámetros de este observador. Tanto el observador de la fuerza de contacto como el procedimiento de calibración automático han sido verificados experimentalmente en un robot industrial ABB con arquitectura software abierta. Copyright © 2007 CEA-IFAC.

**Palabras clave:** Control de fuerza en robots manipuladores, Fusión sensorial, Observadores, Calibración Automática.

### 1. INTRODUCCIÓN

Para un robot manipulador sin sensores en su extremo final, éste ha de seguir una trayectoria sin otra realimentación que la que ofrecen sus sensores de posición de las articulaciones. Esto implica importantes restricciones en la ejecución de tareas donde es necesaria la aplicación de una determinada fuerza sobre el entorno de trabajo. Sin embargo, con la ayuda de sensores, un sistema manipulador exhibe cierta capacidad adaptativa posibilitando la realización de tar-

eas más complejas (Luo *et al.*, 1987)(Harashima and Dote, 1990)(Kumar and Garg, 2004).

En particular, cuando un robot manipulador entra en contacto con su entorno, esta interacción sólo puede llevarse a cabo si las fuerzas que se ejercen son controladas adecuadamente, siendo éste el motivo por el que el control de fuerza resulta de extrema importancia en los robots manipuladores (Lange and Hirzinger, 2001). Normalmente, para realizar este control se coloca un sensor de fuerza en la muñeca del robot cerrando el lazo de control. Ahora bien, en una situación dinámica, el sensor de fuerza no sólo

mide las fuerzas y pares de contacto, sino que también mide las fuerzas de inercia (Uchiyama, 1979)(Alcocer *et al.*, 2003). Puesto que las fuerzas de inercia son perturbaciones introducidas en las medidas de fuerza utilizadas en el lazo de control, éstas afectarán negativamente el comportamiento de la tarea a realizar. Por lo tanto, es necesario procesar las medidas del sensor de fuerza substrayendo adecuadamente las fuerzas de contacto ejercidas por el robot manipulador.

Se han propuesto diferentes soluciones para superar este problema. Inicialmente, Fujita e Inoue (1979) estimaron las fuerzas de contacto a través de galgas extensiométricas. En su método, las fuerzas externas eran medidas a través de las galgas y las fuerzas de inercia eran filtradas utilizando la trayectoria de referencia del extremo del manipulador. Posteriormente, Uchiyama *et al.* (1985) propusieron utilizar el error de la trayectoria como señal para la estimación de las fuerzas y pares externos en un lazo de control del par de las articulaciones del robot. Estos métodos, sin embargo, requieren el conocimiento tanto de la trayectoria a realizar como las características del entorno de trabajo (rigidez, geometría...).

Para evitar este inconveniente, Uchiyama y Kitagaki (1989) propusieron un filtro óptimo para extraer las fuerzas y pares externos de las señales medidas por el sensor de fuerza. Su método estimaba, a partir del modelado dinámico del extremo del robot manipulador, las fuerzas y pares de contacto a través de un filtro de Kalman utilizando como medidas las del propio sensor de fuerza.

Continuando con esta teoría, Lin (1997) diseñó un lazo de control que consistía básicamente en un controlador de posición y un compensador de la fuerza de contacto en el lazo de realimentación. Para estimar la fuerza de contacto, Lin desarrolló un observador que utilizaba el modelo dinámico de la herramienta. El inconveniente de este planteamiento radicaba en que, para algunas de las variables dinámicas como es el caso de la aceleración de la herramienta, éstas eran estimadas a partir del modelo cinemático del robot manipulador y de las medidas de los sensores de posición, disminuyendo, por tanto, la precisión del sistema. Esta disminución se debe, principalmente, a dos motivos: el primero de ellos radicaba en que estimaba la posición del extremo final a partir del modelo cinemático estimado del manipulador, mientras que el segundo, se basaba en que la aceleración era estimada a partir de la doble diferenciación de esta posición.

En este artículo se presenta una metodología para la estimación de la fuerza de contacto que resuelve los problemas anteriores añadiendo un acelerómetro a la herramienta del manipulador y desarrollando una metodología que, basada en técnicas de fusión sensorial, integra la información de sensores de fuerza, posición y aceleración con el objetivo de obtener un estimador de la fuerza de contacto normal a la superficie con unas características dinámicas apropiadas.

En lo que se refiere a la fusión sensorial, ésta representa un conjunto de técnicas para la integración de medidas procedentes de distintas fuentes (Sasiadek, 2002), esto es, la información recibida de los sensores es procesada con el fin de obtener una mejor representación del entorno. Básicamente, estos algoritmos pueden ser agrupados en tres grupos diferentes: fusión basada en modelos probabilísticos (Coue *et al.*, 2002)(Lazaro and Aranda, 2000), fusión basada en técnicas de mínimos cuadrados (Drolet *et al.*, 2000)(Gamez *et al.*, 2004) y, por último, fusión inteligente (Sasiadek and Khe, 2001). En este trabajo se ha utilizado una técnica de fusión sensorial basada en la utilización de técnicas de mínimos cuadrados, y más concretamente, en el filtro de Kalman.

Por otro lado, para poder aplicar esta nueva metodología en la industria es necesario contar con un procedimiento 'plug-and-play' que permita la integración automática del nuevo sistema sensorial en un robot industrial de forma sencilla, rápida y eficaz (Gamez *et al.*, 2005a). En este sentido, se propone, junto con el observador de la fuerza de contacto mencionado, un procedimiento de calibración automática que permita el diseño y optimización de este observador de forma fácil y sin ningún coste añadido.

Para la verificación de las mejoras introducidas por el observador, así como el comportamiento del procedimiento de calibración automático, se ha utilizado un algoritmo clásico de control de fuerza conocido como *Control de Impedancia* (Hogan, 1985)(Johansson and Robertsson, 2003). Estos algoritmos han sido implementados en un robot manipulador industrial ABB con arquitectura software abierta.

Este artículo se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 se describe la formulación del problema. En la sección 3 se presenta el observador de la fuerza de contacto, mientras que en la sección 4 se desarrolla el procedimiento de calibración automático. En la sección 5 se describe la plataforma de experimentación utilizada mientras que en la sección 6 el modelado e identificación del sistema. El apartado 7 muestra algunos de los resultados experimentales obtenidos. Finalmente, en las secciones 8 y 9 se muestran respectivamente las discusiones y las conclusiones del trabajo.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considérese una situación en la que un robot manipulador interacciona con su entorno a través de una herramienta conectada a un sensor de fuerza el cual, a su vez, está conectado a la muñeca del manipulador (Fig. 1). En el momento en el que el robot entra en contacto con la superficie de interés, el sensor de fuerza colocado en la muñeca del robot obtiene, en una única medida, dos tipos de fuerzas (Ec. 1): la fuerza del entorno o fuerza de contacto ( $F$ ) y la fuerza de inercia producida por la aceleración ( $F_I$ )

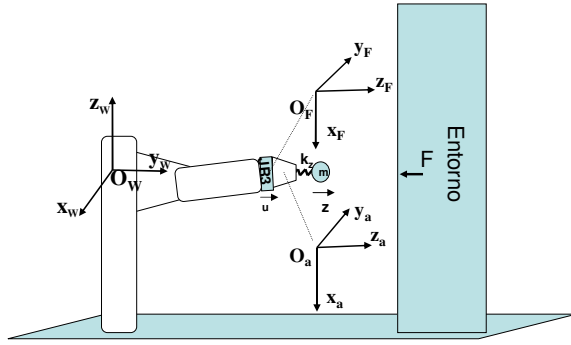


Figura 1. Sistemas de coordenadas.

$$u = F + F_I \quad (1)$$

Habitualmente, los algoritmos de control de fuerza utilizan las medidas del sensor  $u$  aunque, para llevar a cabo la tarea correctamente, la tarea requiere el control de la fuerza de contacto  $F$  (Gamez *et al.*, 2005b).

En este sentido, se propone utilizar las medidas de un acelerómetro ubicado en la herramienta del robot junto con las de fuerza medidas por el sensor de fuerza para estimar la fuerza de contacto  $F$ . Para ello, se utilizarán técnicas de fusión sensorial que integren la información del sensor de fuerza, de posición y de aceleración con el objetivo de obtener un estimador con una respuesta dinámica apropiada.

### 2.1 Descripción de los sistemas de referencia

Como se muestra en la Fig. 1,  $O_F X_F Y_F Z_F$  y  $O_A X_A Y_A Z_A$  corresponden a los sistemas de referencia del sensor de fuerza y del acelerómetro respectivamente. El sistema de referencia origen del sistema viene dado por  $O_W X_W Y_W Z_W$  y coincide con el sistema de referencia del robot. Para nuestro propósito, el observador de la fuerza de contacto será desarrollado para las fuerzas ejercidas en la dirección del eje  $O_F Z_F$ .

Sea  $R_F^W$  la matriz de rotación que relaciona el sistema de referencia del sensor de fuerza y el sistema de referencia global del sistema y  $R_A^F$  la matriz de rotación que relaciona los sistemas de referencia del sensor de fuerza y del acelerómetro. Considérese que el sensor de fuerza está rígidamente ubicado en la extremidad del robot, que el acelerómetro está colocado sobre la herramienta del robot manteniendo la siguiente restricción para simplificar la notación

$$R_A^F = I_{3 \times 3} \quad (2)$$

## 3. OBSERVADOR DE FUERZA

El objetivo del observador de fuerza que se presenta es la estimación de la fuerza de contacto, esto es, separar y compensar, de la medida obtenida a través del sensor

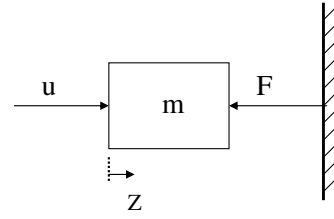


Figura 2. Esquema simplificado de la interacción de fuerza entre la herramienta del robot y el entorno.

de fuerza colocado en la muñeca del robot, la fuerza de inercia de la fuerza de contacto.

Considérese el esquema simplificado de la herramienta del robot (Fig. 2) en la que la masa  $m$  representa la masa de la herramienta,  $u$  es la fuerza medida por el sensor de fuerza y  $F$  es la fuerza de contacto ejercida por el entorno. Llamando  $\xi = (\xi_1, \xi_2)^T = (z, \ddot{z})^T$ , la ecuación (1) queda como:

$$m\ddot{\xi}_1 = u - F \quad (3)$$

Escribiendo la ecuación (3) en la formulación del espacio de estados se tiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & -\frac{1}{m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ F \end{pmatrix} \quad (4)$$

Como la posición, la aceleración y la fuerza son medibles, se considerarán éstas como las salidas 'y' del sistema:

$$y = \begin{pmatrix} c_1 \xi_1 \\ c_2 \xi_2 + c_3 F \\ c_4 \xi_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_3 & c_2 \\ 0 & 0 & c_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ F \end{pmatrix}, \quad (5)$$

o bien,

$$y = \begin{pmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{c_2}{m} & c_3 - \frac{c_2}{m} \\ \frac{c_4}{m} & -\frac{c_4}{m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ F \end{pmatrix} \quad (6)$$

donde todas las medidas están multiplicadas por una ganancia configurable  $c_i$ . En notación simplificada se tiene:

$$y = C\xi + D \begin{pmatrix} u \\ F \end{pmatrix} \quad (7)$$

A continuación, a partir de las ecuaciones de estado anteriores, se pondrán diferentes observadores de la fuerza de contacto analizando las propiedades estocásticas de cada uno de ellos. Analizando estas propiedades se comprobará cómo estos estimadores son sensibles al ruido de los sensores por lo que se propone un observador dinámico de la fuerza de contacto con propiedades de filtrado paso-bajos.

### 3.1 Observador estático de la fuerza

A partir de las ecuaciones anteriores se plantea el siguiente observador de fuerza

$$\hat{F} = D^\dagger y = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{c_2}{m} & \frac{c_3 m - c_2}{m} \\ \frac{c_4}{m} & \frac{-c_4}{m} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} y \quad (8)$$

Donde  $\hat{F}$  es la fuerza estimada y  $D^\dagger$  es la pseudoinversa de  $D$ . Puesto que las constantes de calibración  $\{c_i\}_{i=1}^4$  son conocidas y distintas de cero, el observador nos ofrecerá una medida exacta de la fuerza  $F$  sin tener en cuenta ninguna dinámica. Por tanto, desarrollando la ecuación (8) se obtiene

$$\hat{F} = \frac{1}{c_3 c_4} (0 \ c_4 \ -c_2) y \quad (9)$$

siendo por tanto

$$\hat{F} = F \quad (10)$$

### 3.2 Observador dinámico de la fuerza

Uniendo las ecuaciones (4) y (6) en una formulación en espacio de estados tenemos

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi + B(u - F) \\ y = C\xi + D_u u + D_F F \end{cases} \quad (11)$$

donde las matrices  $A, B, C, D_u$  y  $D_F$  se obtienen de las ecuaciones (6) y (4) siendo

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ m \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$C = \begin{pmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, D_u = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{c_2}{m} \\ \frac{c_4}{m} \end{pmatrix}, D_F = \begin{pmatrix} 0 \\ c_3 - \frac{c_2}{m} \\ -\frac{c_4}{m} \end{pmatrix}$$

Como se mencionó previamente, se ha desarrollado un observador para la estimación de la fuerza del entorno en el sistema (11). En este sentido, se utiliza un observador (Ec. 13) donde la entrada  $F$  no ha sido considerada y en el que en función de la variación entre las medidas y la salida de éste se estiman las fuerzas externas que actúan en el sistema.

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}} = A\hat{\xi} + Bu + K(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{\xi} + D_u u \end{cases} \quad (13)$$

donde  $\hat{\xi}$  corresponde a la estimación de  $\xi$  siendo  $\hat{\xi} = (\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_2)^T$  y con la matriz de ganancia

$$K = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \end{pmatrix} \quad (14)$$

La dinámica del error de la estimación  $\tilde{\xi} = \xi - \hat{\xi}$  se obtiene como

$$\dot{\tilde{\xi}} = (A - KC)\tilde{\xi} - (B + KD_F)F \quad (15)$$

$$\tilde{y} = y - \hat{y} = C\tilde{\xi} + D_F F \quad (16)$$

De la dinámica del error se comprueba que si la parte real de los autovalores de la matriz  $(A - KC)$

es negativa, el observador es estable. Un observador dinámico de la fuerza podría ser obtenido como:

$$\hat{F} = D_F^\dagger (-C\tilde{\xi} + \tilde{y}) \quad (17)$$

con la propiedad

$$\hat{F} = D_F^\dagger (-C\tilde{\xi} + \tilde{y}) = D_F^\dagger D_F F = F \quad (18)$$

En el caso que aquí se estudia, donde  $D_F^\dagger C\tilde{\xi}_1 = 0$ , una forma particularmente simple de un observador de fuerza sería

$$\hat{F} = D_F^\dagger \tilde{y} \quad (19)$$

### 3.3 Dinámica estocástica

En el caso de existir perturbaciones estocásticas, consideramos la dinámica del sistema como

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi + B(u - F) + v_\xi \\ y = C\xi + D_u u + D_F F + v_y \end{cases} \quad (20)$$

donde  $v_\xi$  y  $v_y$  son los ruidos del proceso y de las medidas respectivamente, con

$$\mathcal{E}\left\{\begin{pmatrix} v_\xi \\ v_y \end{pmatrix}\right\} = 0, \mathcal{E}\left\{\begin{pmatrix} v_\xi \\ v_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_\xi \\ v_y \end{pmatrix}^T\right\} = Q = \begin{pmatrix} Q_{\xi\xi} & Q_{\xi y} \\ Q_{y\xi} & Q_{yy} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Las propiedades estocásticas del error del estimador estático y del estimador dinámico de la fuerza  $\tilde{F}$  serían, respectivamente,

$$\tilde{F} = F - \hat{F} = F - D_F^\dagger y = -D_F^\dagger v_y \quad (22)$$

$$\mathcal{E}\{\tilde{F}\} = 0, \mathcal{E}\{\tilde{F}\tilde{F}^T\} = D_F^\dagger Q (D_F^\dagger)^T \quad (23)$$

y

$$\tilde{F} = F - \hat{F} = F - D_F^\dagger (\tilde{y} - C\tilde{\xi}) = -D_F^\dagger v_y \quad (24)$$

$$\mathcal{E}\{\tilde{F}\} = 0, \mathcal{E}\{\tilde{F}\tilde{F}^T\} = D_F^\dagger Q (D_F^\dagger)^T \quad (25)$$

En cuanto a las propiedades de nuestro observador, consideramos inicialmente la ecuación (15) transformándola a

$$\tilde{\xi} = (sI - A + KC)^{-1} (B + KD_F) F(s) \quad (26)$$

donde, usando la ecuación (16), tendríamos

$$-D_F \hat{F}(s) + \tilde{y} = (sI - A + KC)^{-1} (B + KD_F) F(s) \quad (27)$$

Operando, obtendríamos la siguiente función de transferencia

$$D_F \hat{F}(s) = -C(sI - A + KC)^{-1} (B + KD_F) F(s) + D_F F(s) + v_y + C v_\xi \quad (28)$$

resultando finalmente

$$\hat{F}(s) = D_F^\dagger (-C(sI - A + KC)^{-1}(B + KD_F) + D_F)F(s) + D_F^\dagger v_y + D_F^\dagger C v_\xi \quad (29)$$

$$= F(s) + D_F^\dagger v_y + D_F^\dagger C v_\xi \quad (30)$$

Se muestra de esta forma que, aunque estos estimadores de fuerza son insesgados, estos son sensibles al ruido ( $D_F^\dagger v_y(s)$ ) que introducen los sensores (tanto el acelerómetro como el sensor de fuerza) por lo que se hace necesario considerar un tipo de observador con propiedades de filtrado.

### 3.4 Observador de fuerza con propiedades de filtrado

Puesto que los estimadores anteriormente presentados son sensibles al ruido del sistema, a continuación se propone un observador dinámico de la fuerza de contacto con propiedades de filtrado. En la ecuación (15) se aprecia la importancia de la ganancia ( $K$ ) ya que determina el comportamiento del estimador. Para conseguir una estimación apropiada de las fuerzas de contacto, éstas deberían ser lo suficientemente elevadas para poder desprestigiar el ruido del sistema. Para conseguir esta propiedad existen diferentes técnicas de diseño de  $K$ : mediante la técnica denominada ‘Por ubicación de polos’ o bien utilizando el ‘Filtro de Kalman’. En este trabajo, la solución adoptada está basada en el filtro de Kalman (1960).

Para esta técnica, si conocemos las propiedades de ruido del sistema, es posible diseñar un observador que minimiza la varianza del error de estimación de la salida. En nuestro caso, esto supone minimizar el error de la estimación de fuerza. De esta forma, considerando el sistema (20) y suponiendo que el ruido del proceso  $v_\xi$  y de las medidas  $v_y$  son blancos, gaussianos, de media cero, e independientes con matrices de covarianza constantes  $Q$  y  $R$  respectivamente, existe una ganancia del observador  $K$  para el sistema (15) que minimiza la varianza del error de estimación debido al ruido del sistema. Esta ganancia se calcula como

$$K = PC^T R^{-1} \quad (31)$$

donde la matriz  $P$  es solución de la ecuación de Riccati

$$PA^T + AP - PC^T R^{-1} CP + Q = 0 \quad (32)$$

donde

$$E[v_\xi(t) v_\xi^T(\tau)] = Q_{\xi\xi}(t) \delta(t - \tau); E[v_\xi(t)] = 0 \quad (33)$$

$$E[v_y(t) v_y^T(\tau)] = Q_{yy}(t) \delta(t - \tau); E[v_y(t)] = 0$$

$$E[v_\xi(t) v_y^T(\tau)] = Q_{\xi y}(t) \delta(t - \tau) = 0; \text{ para todo } t \text{ y } \tau$$

Con esta solución, la ganancia del observador  $K$  es elegida de forma que minimice la varianza del error de estimación debido al ruido del sistema, pero no debido a la varianza propiciada por la fuerza de contacto, es decir, como la varianza de la fuerza no es estacionaria bajo las condiciones de la aplicación, no existe una única ganancia óptima para el observador.

Por otro lado, resulta necesario determinar la ganancia estática del observador de forma que éste cumpla con la Segunda Ley de Newton establecida en la ecuación (3). Descomponiendo la ecuación (15) obtenemos

$$\begin{aligned} \ddot{\xi}_1 &= -k_{11}c_1\ddot{\xi}_1 + \ddot{\xi}_2 + k_{11}c_1\dot{\xi}_1 \\ &\quad + \frac{k_{12}c_2 + k_{13}c_4}{m}u - k_{1y} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\xi}_2 &= -k_{21}c_1\ddot{\xi}_1 + k_{21}c_1\dot{\xi}_1 \\ &\quad - \frac{1}{m}F + \frac{k_{22}c_2 + k_{23}c_4}{m}u - k_{2y} \end{aligned} \quad (35)$$

Derivando la ecuación (34) y utilizando (35) se obtiene una expresión de la dinámica de  $\ddot{\xi}_1$  como

$$\ddot{\xi}_1 + \Lambda_1\dot{\xi}_1 + \Lambda_0\xi_1 = \frac{-1}{m}F + \beta \quad (36)$$

con

$$\begin{aligned} \beta &= k_{21}c_1\dot{\xi}_1 + \frac{k_{22}c_2 + k_{23}c_4}{m}u - k_{2y} \\ \Lambda_1 &= k_{11}c_1, \quad \Lambda_0 = k_{21}c_1 \end{aligned} \quad (37)$$

Entonces, para las fuerzas del entorno  $F$  variables en el tiempo lentamente, es posible obtener una estimación de  $F$  como

$$\hat{F} = m(\beta - \Lambda_0\ddot{\xi}_1) \quad (38)$$

Esta suposición afecta relativamente la respuesta del observador de fuerza pues, como se observa en los resultados experimentales, la salida del observador resulta adecuada ante situaciones en las que se requieren una rápida respuesta; por ejemplo, durante la fase de transición.

Definiendo el error del estimador de fuerza como  $\tilde{F} = F - \hat{F}$  y considerando las ecuaciones (15) y (38), la dinámica del observador quedaría reflejada en el siguiente sistema en espacio de estados:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\xi}} = (A - KC)\tilde{\xi} - KC\xi - BF + KD_u u - Ky \\ \tilde{F} = F - m(\beta - \Lambda_0\ddot{\xi}_1) \end{cases} \quad (39)$$

donde  $F$  es la entrada y  $\tilde{F}$  es la salida. La función de transferencia de  $F$  a  $\tilde{F}$  es:

$$\begin{aligned} \tilde{F}(s) &= \frac{s(s + k_{11}C_1)}{s^2 + k_{11}c_1s + k_{21}c_1}(\beta - \frac{1}{m}F) \\ &= H(s)(\beta - \frac{1}{m}F) \end{aligned} \quad (40)$$

donde  $H(s)$  es una función estrictamente estable para todo  $k_{11} > 0$  y  $k_{21} > 0$ . Además, el sistema tiene un cero en  $s = 0$ , con lo que el error del estimador de fuerza converge a cero para fuerzas del entorno constantes. Por otro lado, los parámetros  $\Lambda_i$  y  $\beta$  contienen toda la información sobre el comportamiento de  $\tilde{F}$ ; y, teniendo en cuenta (36), y eligiendo unas ganancias del observador  $k_{ij}$  apropiadas, es posible modelar esta

dinámica. Utilizando las ecuaciones (38) y (36), un estimador de la fuerza de contacto sería:

$$\hat{F} = m(-k_{21}c_1\hat{\xi}_1 + k_{21}c_1\xi_1 + k_2D_{F1}u - k_2y) \quad (41)$$

donde, haciendo uso de (5),  $c_2 = m$  y el resto de las  $c_i = 1$  para  $i = 1..4$ , tendríamos un estimador de la fuerza de contacto normal a la superficie como

$$\hat{F} = k_{23}u - k_{23}m\ddot{\xi}_1 - k_{21}m\ddot{\xi}_1 \quad (42)$$

Con el objetivo de obtener un conjunto de valores adecuados de  $k_{ij}$  se observa que, cuando  $\ddot{\xi}_1$  converge a cero de acuerdo a una dinámica específica, la ecuación (42) cumple con la segunda ley de Newton expresada en la ecuación (3), imponiendo la siguiente restricción

$$k_{23} = 1 \quad (43)$$

Nótese que la elección de esta ganancia no modifica el comportamiento dinámico del observador, sólo su ganancia estática.

#### 4. PROCEDIMIENTO DE AUTO-CALIBRACIÓN

La idea básica del procedimiento de auto-calibración es la utilización de una secuencia predefinida de movimientos que permitan estimar el conjunto de parámetros utilizado por el observador de la fuerza de contacto con propiedades de filtrado propuesto en (42). A continuación se describen las parámetros que necesitan ser estimados para dar paso, posteriormente, al desarrollo del procedimiento.

##### 4.1 Parámetros que han de ser estimados

Para poder desarrollar el estimador de la fuerza de contacto propuesto en (42) es necesario estimar los siguientes parámetros:

- *Cálculo de la masa de la herramienta:* para determinar la masa de la herramienta se orienta el robot de forma que se pueda medir su peso utilizando el sensor de fuerza.
- *Calibración del acelerómetro:* básicamente, los procedimientos de calibración de acelerómetros pueden dividirse en dos grandes grupos. El primero de ellos, denominado calibración estática, se basa en el posicionamiento del acelerómetro en diferentes orientaciones del campo gravitacional. El segundo método, conocido como calibración dinámica, utiliza sensores adicionales como giróscopos o incluso sistemas de posicionamiento global. Esta calibración tiene el inconveniente de requerir sensores externos precisos, y por tanto costosos, para llevar a cabo una buena calibración (Hernandez, 2001).

Los parámetros que se han de estimar para calibrar el acelerómetro son los parámetros no conocidos de la ecuación:

$$V_{ZA} = K_{gain} a_{ZA} + V_o \quad (44)$$

donde  $V_{ZA}$  es la salida en tensión del sensor de aceleración para el eje  $O_AZ_A$ ,  $K_{gain}$  es la sensibilidad del acelerómetro que relaciona la medida en tensión con la aceleración  $a_{ZA}$  medida en  $ms^{-2}$  y  $V_o$  es el offset del sensor.

- *Obtención de las ganancias del observador:* La matriz  $K$  (Ec. 14) se determina utilizando la ecuación (31).

##### 4.2 Procedimiento Automático

Dentro de esta sección se propone un algoritmo que calibra automáticamente un observador de la fuerza de contacto siguiendo una serie de pasos. Este algoritmo pretende, a partir de cualquier tipo de acelerómetro—p. e. un acelerómetro capacitivo—, la integración de sus medidas con la información tomada por un sensor de fuerza para estimar la fuerza de contacto con unas propiedades adecuadas en términos de respuesta y filtrado. A continuación se muestra el procedimiento completo. Considerar que  $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ .

**Paso 1:** El robot es situado automáticamente de forma que  $R_F^W = R_{F1}^W$ , siendo

$$R_{F1}^W = Rot(Y_W, \alpha) Rot(Z_W, \delta) Rot(X_W, \theta), \quad (45)$$

es decir,

$$R_{F1}^W = \begin{pmatrix} c_\alpha c_\delta & -c_\alpha s_\delta c_\theta - s_\alpha s_\theta & c_\alpha s_\delta s_\theta - s_\alpha c_\theta \\ s_\delta & c_\delta c_\theta & -c_\delta s_\theta \\ -s_\alpha c_\delta & s_\alpha s_\delta c_\theta + c_\alpha s_\theta & -s_\alpha s_\delta s_\theta + c_\alpha c_\theta \end{pmatrix} \quad (46)$$

con  $s = \sin$ ,  $c = \cos$ ,  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  rad,  $\delta = \frac{\pi}{2}$  rad y  $\theta = \frac{-\pi}{2}$  rad. Inicializar el sensor de fuerza y establecer  $t_0 = t$ .

**Paso 2:** La herramienta es mantenida en esa posición desde  $t_0$  hasta  $t_1$  evitando cualquier movimiento. Calcular:

$$u_{ZF}^h = \frac{1}{(n_{t1} - n_{t0})} \sum_{k=n_{t0}}^{n_{t1}} u_{ZF}(k) \quad (47)$$

donde  $n$  es el número de muestreos por segundo,  $n_{t0} = t_0 n$ ,  $n_{t1} = t_1 n$  y  $u_{ZF}(k)$  es la medida  $k$  del sensor de fuerza para el eje  $z$ .

**Paso 3:** El robot es ubicado de forma que  $R_F^W = R_{F3}^W$  para el paso 3) siendo

$$R_{F3}^W = Rot(Z_W, \delta) Rot(X_W, \theta), \quad (48)$$

esto es,

$$R_{F3}^W = \begin{pmatrix} c_\delta & -s_\delta c_\theta & s_\delta s_\theta \\ s_\delta & c_\delta c_\theta & -c_\delta s_\theta \\ 0 & s_\theta & c_\theta \end{pmatrix} \quad (49)$$

Establecer  $t_2 = t$ .

**Paso 4:** La herramienta es mantenida en esa posición desde  $t_2$  hasta  $t_3$  evitando cualquier movimiento. Calcular

$$u_{Z_F}^v = \frac{1}{(n_{t_3} - n_{t_2})} \sum_{k=n_{t_2}}^{n_{t_3}} u_{Z_F}(k) \quad (50)$$

donde  $n_{t_2} = t_2 n$  y  $n_{t_3} = t_3 n$ .

**Paso 5:** Calcular el offset del acelerómetro  $V_o$  como (Eq. 44):

$$V_o = \frac{1}{(n_{t_3} - n_{t_2})} \sum_{k=n_{t_2}}^{n_{t_3}} V_{Z_A}(k) \quad (51)$$

donde  $V_{Z_A}(k)$  es la medida del acelerómetro para el eje  $O_A Z_A$ .

**Paso 6:** Calcular la masa ( $m$ ) como:

$$m = \frac{|u_{Z_F}^v - u_{Z_F}^h|}{g} \quad (52)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.

**Paso 7:** Aplicar una señal escalón al robot en el eje  $O_F Z_F$  desde  $t_3$  a  $t_4$ .

**Paso 8:** Calcular:

$$K_{gain} = \frac{1}{(\theta(k)^T \theta(k))^{-1} \theta(k)^T Y(k)} \quad (53)$$

donde  $\theta$  y  $Y$  son vectores de dimensión  $(t_4 - t_3)n$  con (Eq. 44):

$$\begin{aligned} \theta(k) &= V_{Z_A}(k) - V_o \\ Y(k) &= \frac{u_{Z_F}(k)}{m} \end{aligned}$$

para  $k = t_3 n \dots t_4 n$ .

**Paso 9:** Calcular las matrices de covarianza  $Q$  (Ec. 33).

**Paso 10:** Calcular la ganancia del observador ( $K$ ) como (Ec. 31):

$$K = PC^T R^{-1} \quad (54)$$

donde  $P$  se obtiene a través de la siguiente ecuación de Ricatti (Ec. 32):

$$PA^T + AP - PC^T R^{-1} CP + Q = 0. \quad (55)$$

**Paso 11:** Establecer  $k_{23} = 1$  (Ec. 43). Destacar al modificar este parámetro de la ganancia  $K$  del observador no interfiere en la dinámica del observador, sólo en su ganancia estática.

#### 4.3 Velocidad de ejecución

Analizando el algoritmo de calibración automática se aprecia claramente que gran parte del tiempo consumido por el procedimiento se debe a los movimientos

del robot. En este sentido, el tiempo invertido para llevar a cabo la autocalibración dependerá del tiempo que tarde el robot manipulador en llevar a cabo los movimientos, además del tiempo necesario para que la posición de la herramienta se establezca.

Para el procedimiento completo aplicado a un robot industrial ABB, nuestro algoritmo requiere en torno a 16 segundos para calibrar el observador de la fuerza de contacto. Una vez que los movimientos son llevados a cabo, el número de operaciones aritméticas ( $N$ ) calculadas son aproximadamente:

$$N = ((t_1 - t_0) + 2(t_3 - t_2) + (t_4 - t_3))n \quad (56)$$

donde  $n$  es el número de muestreos por segundo.

#### 4.4 Análisis del error

Los objetivos que se pretenden conseguir con este análisis del error son (Tsai and Lenz, 1989):

- Revelar cuáles son los factores críticos que influyen en la precisión final del observador.
- Conocer cómo se puede mejorar esta precisión.
- Establecer si el procedimiento de calibración automático se ha llevado a cabo de forma apropiada.

Para estimar el error introducido por la estimación de la masa se aplica el siguiente razonamiento: por un lado consideramos la masa de la herramienta ( $m$ ) como:

$$m = \frac{R_{F_1}^W P_y - R_{F_3}^W P_z}{g} \quad (57)$$

donde  $P_y$  y  $P_z$  son las fuerzas de la gravedad de la herramienta proyectadas a lo largo de los ejes  $O_W O_Y$  y  $O_W O_Z$  respectivamente. Por otro lado, la masa estimada  $m_e$  resulta

$$m_e = \frac{R_{F_{e1}}^W P_z - R_{F_{e3}}^W P_x}{g} \quad (58)$$

donde  $(R_{F_{e1}}^W)$  y  $(R_{F_{e3}}^W)$  son las matrices de rotación  $(R_F^W)$  aplicadas en los pasos 1 y 3 respectivamente. Finalmente, el error introducido por la estimación de la masa ( $e_m$ ) es

$$e_m = \frac{(R_{F_1}^W - R_{F_{e1}}^W)P_z - (R_{F_3}^W - R_{F_{e3}}^W)P_x}{g}. \quad (59)$$

Para calcular el error introducido por la estimación de los parámetros del acelerómetro aplicamos el mismo razonamiento. Entonces, el error de offset ( $e_o$ ) se estima como

$$e_o = (R_{F_3}^W - R_{A_4}^W)V_o \quad (60)$$

donde  $R_{A_4}^W$  es  $R_A^W$  para el paso 4. En este sentido, si los sistemas de coordenadas del acelerómetro y del sensor de fuerza están perfectamente alineados, y además  $R_{F_4}^W = R_{F_3}^W$ , el error ( $e_o$ ) será cero. Por otro lado, el

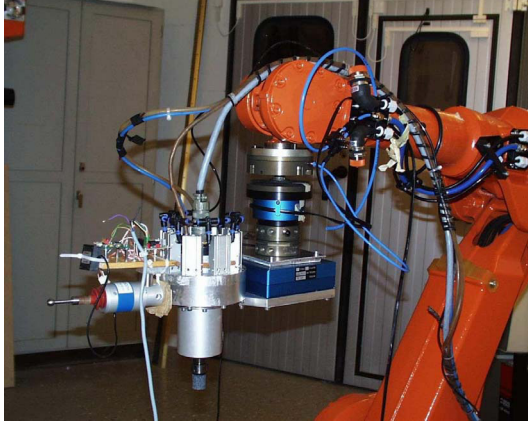


Figura 3. Configuración experimental. Para la experimentación se ha utilizado un robot industrial ABB IRB 2400 dotado de una arquitectura abierta. El control de impedancia se realiza perpendicular al entorno. El acelerómetro es colocado en la herramienta mientras que el Optidrive es situado entre la herramienta y el sensor de fuerza JR3.

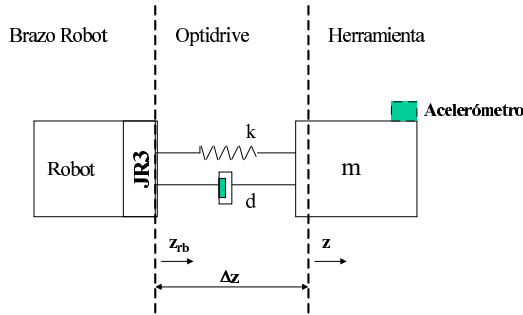


Figura 4. Esquema del sistema robot-herramienta.  $z_{rb}$  representa la posición del extremo final del robot,  $z$  es la posición de la herramienta y  $\Delta z$  es la distancia entre ambos.

error introducido en la estimación de la ganancia del acelerómetro ( $e_g$ ) se calcula como

$$e_g = \frac{R_{F_3}^W u_{Z_F} - V_o m}{R_{F_3}^W a_{X_A} m} - \frac{R_{F_{e7}}^W u_{Z_F} - (V_o + e_v)(m + e_m)}{R_{A_{e7}}^W a_{X_A} (m + e_m)} \quad (61)$$

donde  $R_{F_{e7}}^W$  y  $R_{A_{e7}}^W$  son respectivamente  $R_F^W$  y  $R_A^W$  para el paso 7. Se puede verificar que si  $R_{F_{e7}}^W = R_{A_{e7}}^W = R_{F_3}^W$  y  $e_m = e_v = 0$ ,  $e_g$  es igual a cero.

Finalmente, el error del observador de fuerza se estima como

$$e_f = (m + e_m) R_A^W (a_{X_A} + e_a) - m R_F^W a_{X_A} \quad (62)$$

donde

$$e_a = \frac{V - V_o}{K_{gain}} - \frac{V - (V_o + e_v)}{K_{gain} + e_g}. \quad (63)$$

## 5. PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN

El sistema robot-herramienta está compuesto por los siguientes dispositivos y sensores (Fig. 3): un robot

ABB; un sensor de fuerza JR3; un sistema acomodatio denominado Optidrive<sup>®</sup>, el cual une el extremo del robot y la herramienta ofreciendo una respuesta amortiguada; y finalmente, un acelerómetro. La Figura 4 muestra un esquema del sistema.

El sistema robótico utilizado para la realización de los experimentos está basado en un robot manipulador ABB Irb 2400 ubicado en el Laboratorio de Robótica del Departamento de Control Automático de la Universidad de Lund (Suecia). Su característica principal es su arquitectura totalmente abierta, permitiendo la implementación y evaluación de estrategias de control avanzado. El controlador ha sido implementado en Matlab/Simulink utilizando "The Real Time Workshop" de Matlab, siendo posteriormente compilado y enlazado con el controlador del robot (Nilsson and Johansson, 1999)(Johansson *et al.*, 2004).

El sensor de fuerza utilizado ha sido un sensor JR3 de 6 grados de libertad situado en la muñeca del robot, habiéndose realizado el acondicionamiento de señal mediante un DSP. En los experimentos se ha utilizado una herramienta de desbarbado con una masa cercana a los 12 kg. El dispositivo mecánico u Optidrive tiene el propósito de proporcionar cierto amortiguamiento al entrar el robot en contacto con su entorno, es decir, ofrece un comportamiento similar a un conjunto 'muelle-amortiguador'. En este sentido, la variable  $\Delta z$  (Fig. 4) ha sido estimada indirectamente a través de la fuerza medida con el Optidrive. El acelerómetro está situado en el extremo de la herramienta para medir su aceleración. Las señales del acelerómetro y del Optidrive son medidas a través de las entradas analógicas del controlador.

En los experimentos realizados se ha utilizado una pantalla vertical de cartón piedra (Fig. 5) en el que la fuerza del entorno ha sido modelada como un muelle lineal con

$$F = \begin{cases} 0 & \text{if } z \leq z_c \\ k(z - z_c) & \text{if } z > z_c \end{cases}$$

siendo la rigidez de la pantalla,  $k$ , determinada experimentalmente obteniéndose un valor de 5 N/mm. La impedancia ha sido controlada en la dirección perpendicular a la pantalla, que se corresponde a su vez con la dirección  $O_F O_Z$  del robot. De la relación de impedancia se observa que la posición en estado estacionario depende de la relación entre la rigidez del entorno y la rigidez del robot. Si la rigidez del robot fuese muy elevada en comparación con la del entorno, entonces  $z_\infty$  deberá casi coincidir con  $z_r$ , mientras que para un entorno dotado de mucha más rigidez que el robot, el valor de  $z_\infty$  coincidirá con  $z_c$  (Johansson and Robertsson, 2003).

## 6. MODELADO E IDENTIFICACIÓN

El modelo utilizado para diseñar el controlador de impedancia, el cual incluye al robot junto con el



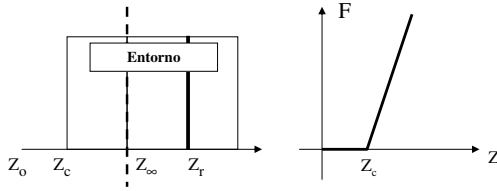


Figura 5. Esquema representando una restricción física donde  $z_c$  es la localización de la pantalla en el entorno,  $z_\infty$  es la posición de la herramienta en estado estacionario y  $z_r$  es la posición deseada de ésta en caso de que el desplazamiento ocurra en espacio libre (izquierda). Cuando el robot entra en contacto con el entorno la fuerza de contacto es modelada como un muelle lineal. Sin contacto, la fuerza es igual a cero (derecha).

subsistema herramienta-optidrive, ha sido considerado exclusivamente en la dirección del eje  $z$  (Fig. 4), lo que se corresponde con el eje de movimiento del Optidrive. Como el sistema está compuesto por el robot y el conjunto herramienta-optidrive, ha sido necesario obtener la dinámica de estos por separado.

Con respecto al robot, se ha identificado el modelo dinámico lineal que relaciona la referencia de posición ( $z_r$ ) con la posición actual del extremo del robot ( $z_{rb}$ ) (Fig. 4). Para ello se ha utilizado el siguiente modelo 'output-error' (Johansson, 1993)(Ljung, 1999):

$$\mathcal{M}: \quad y_k = \frac{B(q)}{F(q)} u_{k-d} + e_k \quad (64)$$

donde  $k$  es el índice de muestreo,  $q$  es el operador de desplazamiento unitario ( $h = 4$  ms),  $\{e_k\}$  es un ruido blanco normalmente distribuido, y  $B(q)$  y  $F(q)$  son polinomios con órdenes:  $nb = nf = 3$ . El retardo  $d$  es 1.

Para el modelo anterior, los parámetros han sido estimados utilizando el Toolbox de Identificación de Sistemas de Matlab (Ljung, 1991). El modelo resultante ha sido:

$$G_1(q) = \frac{1.2348q^{-1} - 1.5084q^{-2} + 0.3011q^{-3}}{1 - 1.0494q^{-1} + 0.0775q^{-2} - 0.0006q^{-3}} \quad (65)$$

Por otro lado, la función de transferencia del subsistema herramienta-Optidrive que relaciona  $z$  con  $z_{rb}$  ha sido obtenida como:

$$G_2(s) = \frac{k + ds}{ms^2 + ds + k} \quad (66)$$

donde  $m_{tool}$  es la masa equivalente, esto es, es la masa que incluye la masa del Optidrive, la masa del acelerómetro y la masa de la herramienta ( $m = m_{herramienta} + m_{acelerometro} + m_{Optidrive}$ ). Para estimar los parámetros de  $G_2$ , esto es,  $m$ ,  $k$  y  $d$ , se ha utilizado la técnica de *Mínimos Cuadrados*.

Finalmente, considerando el sistema completo (robot, herramienta y sensores), y utilizando (65) y (66), las ecuaciones en espacio de estados del sistema son:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bz_r \\ y = CX \end{cases} \quad (67)$$

donde  $X = [\ddot{z}_{rb}, \dot{z}_{rb}, z_{rb}, z, \dot{z}]^T$ ,  $z_r$  es la posición de referencia del extremo del robot y

$$A = \begin{pmatrix} 49.6 & -55.8 & 0.4 & 0 & 0 \\ 658 & 641 & 4.8 & 0 & 0 \\ -8022 & 9077.2 & -1263 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & d/m & k/m & -k/m & -d/m \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 214 \\ -444 \\ 7578 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1.2348 & -1.5084 & 0.3011 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Para comprobar cómo el observador desarrollado mejora las propiedades del control de fuerza que se realice con el extremo de un robot manipulador, éste ha sido incluido en un lazo de control de impedancia. Esta técnica ofrece la posibilidad de controlar la relación dinámica que existe entre la posición del extremo final del robot y la fuerza que ejerce éste sobre su entorno. La relación de impedancia entre la fuerza ( $F$ ) y la posición ( $\xi_1$ ) utilizada en este caso viene dada por la siguiente ecuación:

$$F(t) = K_z z(t) + D_z \dot{\xi}_1(t) \quad (68)$$

donde las ganancias positivas  $K_z$  y  $D_z$  representan los parámetros de diseño para la rigidez y amortiguamiento respectivamente. Por tanto, haciendo que la variable  $Z(s)$  (Ec. 69) converja a cero, podemos controlar el sistema (Johansson and Robertsson, 2003).

$$Z(s) = K_z z(s) + D_z s z(s) - F(s) \quad (69)$$

En este sentido, para hacer que la relación de impedancia propuesta en (69) tienda a cero, se ha utilizado un controlador LQR (Johansson and Robertsson, 2003). Finalmente, la ley de control aplicada ha sido:

$$u = -LX + c\hat{F} + l_r z_r \quad (70)$$

con  $c$  correspondiendo a la ganancia de la fuerza en el control de impedancia;  $\hat{F}$  la estimación de la fuerza del entorno, que en este caso será estimada utilizando el observador de fuerza y cuyos parámetros han sido obtenidos a través del procedimiento de calibración automática;  $z_r$  la referencia de posición; y  $l_r$  la ganancia de posición constante.  $L$  es calculada considerando (67).

Las matrices  $Q$  y  $R$  representan las penalizaciones de los estados y de la señal de control siendo:

$$Q = \begin{pmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_l \end{pmatrix} \quad R = 1000 \quad (71)$$

La elección de estos valores ha sido realizada considerando que  $K_r$  y  $D_r$  afectan a la rigidez y amortiguamiento del robot en la relación de impedancia

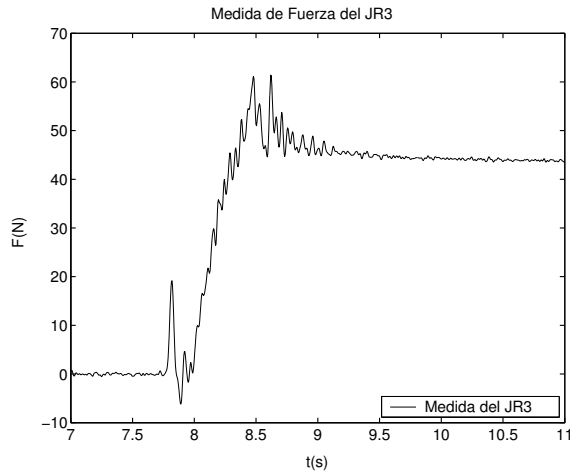


Figura 6. Medida del sensor de fuerza JR3. El robot entra en contacto para  $t = 8s$ .

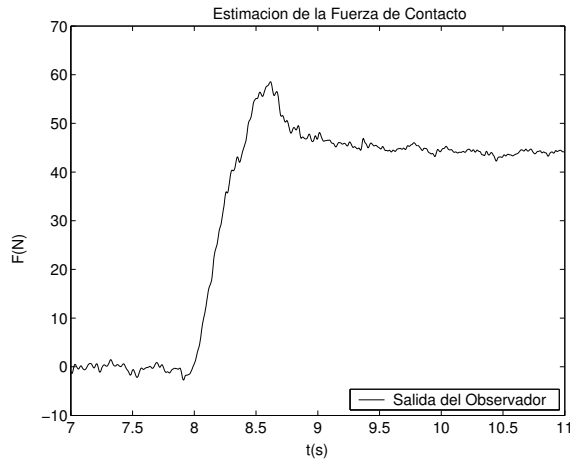


Figura 7. Salida del observador de fuerza. El robot entra en contacto para  $t = 8s$ . Obsérvese como el observador elimina la influencia de las fuerzas de inercia ( $t = 7.8s$  and  $t = 8.5s$ ).

y que  $K_t$  y  $D_t$  corresponden a las penalizaciones en la rigidez y amortiguamiento de la herramienta. Los valores de estos parámetros para los experimentos que aquí se reflejan han sido:  $K_r = 10$ ;  $K_t = 10$ ;  $D_r = 1$ ;  $D_t = 1$ .

Para estimar la aceleración y velocidad del robot se ha utilizado un observador (Henriksson, 2000). En lo que se refiere al observador de fuerza las ganancias obtenidas han sido:  $k_{11} = 0.38$ ;  $k_{12} = 0$ ;  $k_{13} = -0.0073$ ;  $k_{21} = 9.05$ ;  $k_{22} = 0$ ;  $k_{23} = 1$ . La matriz de ganancia  $L$  ha sido calculada utilizando (67) y (71), obteniendo finalmente un valor de  $L$  igual a  $[0.0127 - 0.0034 - 0.00020.00800.0074]$ . La ganancia  $l_r$  ha resultado igual a 1.23.

## 7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para los experimentos, el controlador ha sido implementado en un robot manipulador con arquitectura software abierta con un tiempo de muestreo de 4 ms.

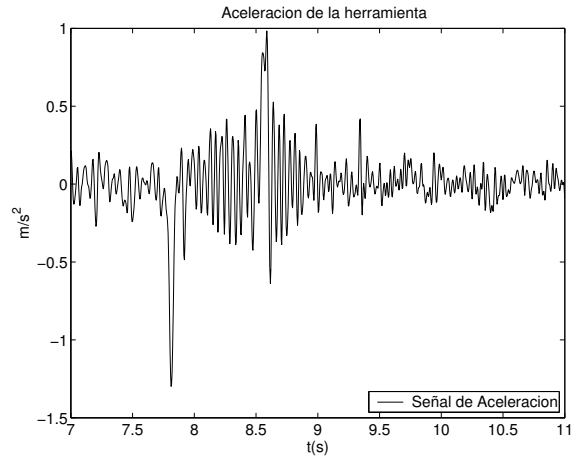


Figura 8. Aceleración del extremo del robot medida por el acelerómetro. Obsérvese el ruido que presenta la señal del acelerómetro.

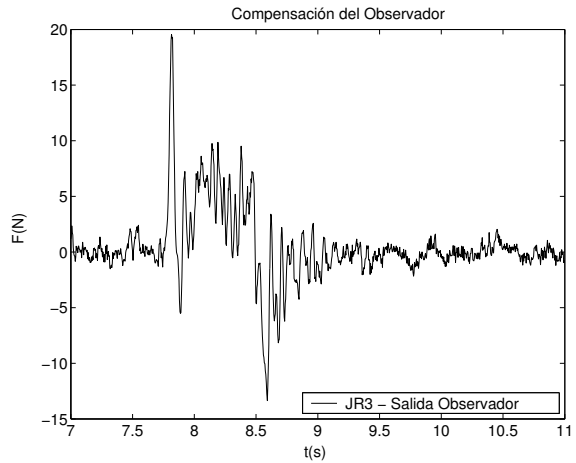


Figura 9. Compensación del observador.

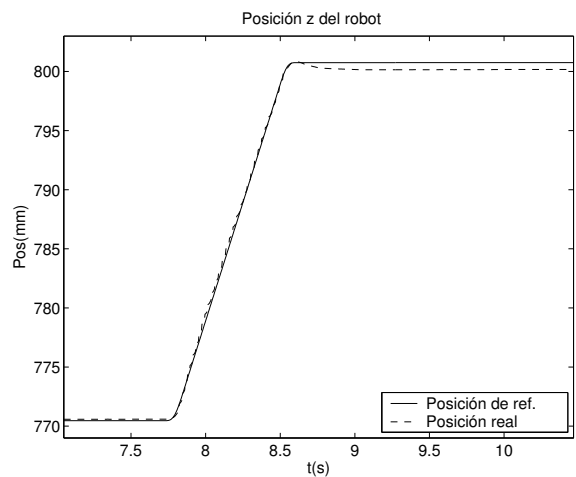


Figura 10. Posición de referencia y posición real del robot durante el experimento. Como entrada de fuerza para el algoritmo de control de impedancia se ha considerado la información del observador. La pantalla está situada en  $z = 780mm$  aproximadamente.

Tanto las simulaciones como los experimentos llevados a cabo han consistido básicamente en tres fases: un movimiento inicial en el espacio libre, una fase de transición y, por último, un movimiento en el espacio restringido.

En relación a los experimentos realizado con el robot ABB, en la figura 6 se muestra la medida tomada por el sensor de fuerza JR3. En la figura 7 se muestra la salida del observador de fuerza para el mismo experimento. Obsérvese como el observador elimina el efecto de las fuerzas de inercia de las medidas tomadas por el sensor de fuerza. En la figura 8 se muestra la aceleración de la herramienta medida por el acelerómetro. Destacar el alto nivel de ruido de esta señal debido, sobre todo, a las oscilaciones a las que se ve sometidas la herramienta. Finalmente, en la figura 9 se muestra la compensación realizada por el observador para el mismo experimento, es decir,  $u - \hat{F}$ . La posición  $z$  del robot durante este experimento se muestra en la figura 10. En la figura 11 se muestran las densidades del espectro de potencia de la señal  $u - m\ddot{\xi}_1$  y de la salida del observador. Nótese como el observador elimina el ruido introducido por los sensores.

## 8. DISCUSIÓN

En los resultados experimentales se aprecia cómo el observador cancela las fuerzas de inercia que se producen cuando el robot inicia el movimiento (Fig. 7 para  $t = 7.8s$ ) y también cuando el extremo del manipulador entra en contacto (Fig. 7 para  $t = 8.5s$ ).

Como el acelerómetro se ve afectado por la resonancia del robot manipulador (Fig. 8), una simple resta de las medidas de fuerza del sensor JR3 con las medidas obtenidas por el acelerómetro proporcionaría como resultado una señal con un nivel alto de ruido.

En este sentido, la solución presentada resuelve este problema. Por otro lado, aunque el observador mejore sustancialmente las propiedades de ruido de las señales a considerar, existe un compromiso entre el nivel de filtrado y la velocidad de respuesta del observador dependiendo éste de las exigencias de la aplicación.

En cuanto a la ecuación (42) se comprueba que, para una elección apropiada de los coeficientes, y teniendo un error estimado de la posición igual a cero, el observador de fuerza cumple con la segunda ley de Newton " $ma = F + u$ " donde  $F$  representa la fuerza de contacto.

Finalmente, cabe la discusión de porqué sólo se ha desarrollado un observador de la fuerza de contacto en el eje normal a la superficie, obviando el resto de los grados de libertad de fuerza así como los pares. En este sentido habría que indicar que ya se está extendiendo el observador propuesto, primeramente, a los tres grados de libertad; y posteriormente, a los tres pares o momentos y se ha observado que los estimadores

cumplen mantienen básicamente las propiedades de este observador.

## 9. CONCLUSIONES

Para estimar apropiadamente la fuerza de contacto en situaciones donde el robot trabaja tanto en espacio libre como en espacio restringido, se ha desarrollado un observador que fusiona las medidas de las fuerzas externas obtenidas a través de un sensor de fuerza situado en la muñeca del robot manipulador junto con las medidas de aceleración y de posición de la herramienta situada en el extremo de éste.

El principal objetivo del observador propuesto ha sido el desarrollo de un estimador de la fuerza de contacto que permita diseñar algoritmos de control de fuerza donde las fuerzas de inercia no interfieran. Este hecho implica la mejora de la fase de transición que ocurre cuando el robot entra en contacto con el medio. Para verificar el comportamiento del observador se han realizado una serie de experimentos con un robot industrial.

Además del observador mencionado, se presenta un algoritmo de calibración automático totalmente autónomo que permite integrar esta nueva técnica de fusión sensorial en cualquier robot industrial de forma simple y rápida. Este procedimiento ofrece una solución 'plug-and-play' para la integración de diferentes tipos de acelerómetros dentro de un sistema robot manipulador y cuyo objetivo sea el de obtener un observador de la fuerza de contacto.

Las principales ventajas de este procedimiento son: su independencia del tipo de acelerómetro; su bajo coste, ya que no es necesario la utilización de dispositivos de calibración extra; y su rápido procesamiento, debido a la simplicidad del algoritmo propuesto.

El comportamiento del observador obtenido a través del procedimiento de calibración automático ha sido verificado satisfactoriamente en un robot manipulador industrial.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la subvención parcial de esta investigación a través del proyecto CYCIT DPI2004-04458; del proyecto Autofett GRDI-2000-25135 del Quinto Programa Marco de la unión Europea; y del proyecto NAC02.

Los autores agradecen también a Tomas Olsson su ayuda en la realización de los experimentos.

## REFERENCIAS

Alcocer, A., A. Robertsson, A. Valera and R. Johansson (2003). Force estimation and control in robot

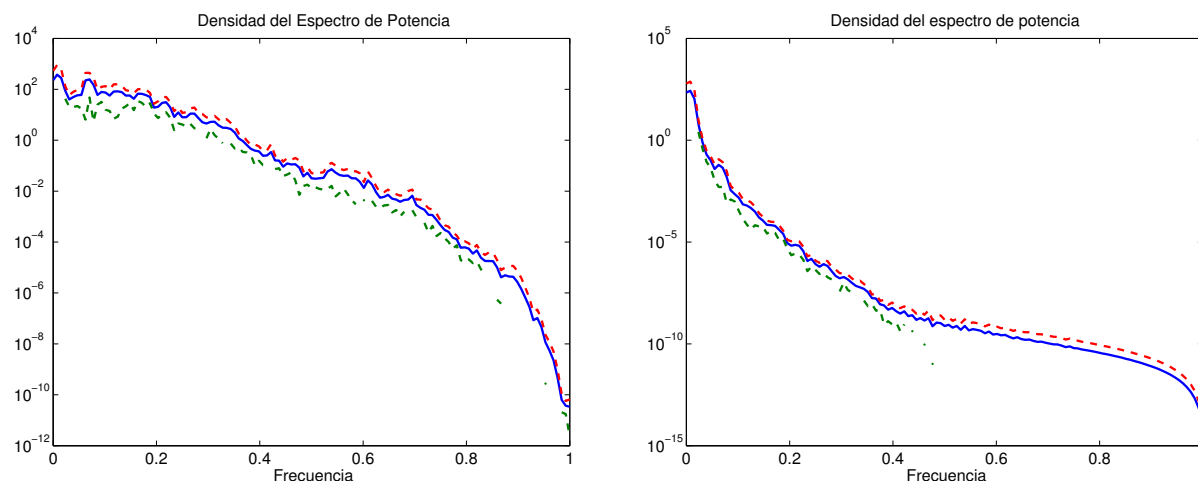


Figura 11. Densidad del espectro de potencia para la señal compuesta  $u - m\ddot{\xi}_1$  (izquierda) y densidad del espectro de potencia de la salida del observador (derecha). Nótese que la escala de frecuencia está normalizada para el tiempo de muestreo.

- manipulators. In: *Proc. 7th Symp. Robot Control (SYROCO'03)*. Wroclaw, Poland. pp. 3686–3691.
- Coue, C., Th. Fraichard, P. Bessiere and E. Mazer (2002). Multi-sensor data fusion using bayesian programming: An automotive application. *IEEE Intelligent Vehicle Symp.* **2**, 442–447.
- Drolet, L., F. Michaud and J. Cote (2000). Adaptable sensor fusion using multiple Kalman filters. In: *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)*. Vol. 2. pp. 1434–1439.
- Fujita, M. and H. Inoue (1979). A study on the processing of force sensor signals. In: *Proc. 1st Annual Conf. of the Robotics Society of Japan*. Tokyo. pp. 151–152.
- Gamez, J., A. Robertsson, J. Gomez and R. Johansson (2004). Sensor fusion of force and acceleration for robot force control. In: *Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*. Sendai, Japan. pp. 3009–3014.
- Gamez, J., A. Robertsson, J. Gomez and R. Johansson (2005a). Automatic calibration procedure for a robotic manipulator force observer. In: *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2005)*. Barcelona, Spain. pp. 2714–2719.
- Gamez, J., A. Robertsson, J. Gomez-Ortega and Rolf Johansson (2005b). Force and acceleration sensor fusion for compliant robot motion control. In: *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2005)*. Barcelona, Spain. pp. 2720–2725.
- Harashima, F. and Y. Dote (1990). Sensor based robot systems. In: *Proc. IEEE Int. Workshop Intelligent Motion Control*. Istanbul, Turkey. pp. 10–19.
- Henriksson, D. (2000). Observer-based impedance control in robotics. Master's thesis. Dept. Automatic Control, Lund University, Sweden.
- Hernandez, W. (2001). Improving the response of an accelerometer by using optimal filtering. *Sensors and Actuators A: Physical* **88**(3), 198–208.
- Hogan, N. (1985). Impedance control: An approach to manipulation, parts 1-3. *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*. ASME **107**, 1–24.
- Johansson, R. (1993). *System Modeling and Identification*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Johansson, R., A. Robertsson, K. Nilsson, T. Brogårdh, P. Cederberg, M. Olsson, T. Olsson and G. Bolmsjo (2004). Sensor integration in task-level programming and industrial robotic task execution control. *Industrial Robot* **31**, 284–296.
- Johansson, R. and A. Robertsson (2003). Robotic force control using observer-based strict positive real impedance control. In: *IEEE Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*. Taipei, Taiwan. pp. 3686–3691.
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Trans. ASME- J. of Basic Engineering* **82**, 35–45.
- Kumar, M. and D. Garg (2004). Sensor based estimation and control of forces and moments in multiple cooperative robots. *Trans. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control* **126**(2), 276–283.
- Lange, F. and G. Hirzinger (2001). A universal sensor control architecture considering robot dynamics. *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI2001)* pp. 277–282.
- Lazaro, A. and J.R. Aranda (2000). Multisensorial fusion for optimal object recognition. *IEEE Ultrasonics Symp.* **1**, 797–800.
- Lin, S.T. (1997). Force sensing using Kalman filtering techniques for robot compliant motion control. *J. of Intelligent and Robotics Systems* **135**, 1–16.
- Ljung, L. (1991). *System Identification Toolbox; User's Guide*. The MathWorks Inc., Natick, MA.
- Ljung, L. (1999). *System Identification - Theory For the User*. 2nd ed, PTR Prentice Hall. Upper Saddle River, N.J.
- Luo, R.C., M.H. Lin and R.S. Scherp (1987). The issues and approaches of a robot multi-sensor

- integration. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation.* Vol. 4. Washington, USA. pp. 1941–1946.
- Nilsson, K. and R. Johansson (1999). Integrated architecture for industrial robot programming and control. *J. Robotics and Autonomous Systems* **29**, 205–226.
- Sasiadek, J. Z. (2002). Sensor fusion. *Annual Reviews in Control* **26(2)**, 203–228.
- Sasiadek, J.Z. and J. Khe (2001). Sensor fusion based on fuzzy Kalman filter. In: *Proc. Second Int. Workshop Robot Motion and Control*. pp. 275 – 283.
- Tsai, R. Y. and R. K. Lenz (1989). A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand/eye calibration. *IEEE Trans. Robotics and Automation* **5(3)**, 345–358.
- Uchiyama, M. (1979). A study of computer control motion of a mechanical arm (2nd report, control of coordinate motion utilizing a mathematical model of the arm). In: *Bulletin of JSME*. pp. 1648–1656.
- Uchiyama, M. and K. Kitagaki (1989). Dynamic force sensing for high speed robot manipulation using Kalman filtering techniques. In: *Proc. of Conf. Decision and Control*. Vol. 12(6). Tampa, Florida. pp. 2147–2152.
- Uchiyama, M., M. Yokota and K. Hakomori (1985). Kalman filtering the 6-axis robot wrist force sensor signal. In: *Proc. Int. Conf. Advanced Robotics*. Tokyo. pp. 153–160.