



LUND UNIVERSITY

Calibración Automática de un Observador de la Fuerza de Contacto para un Robot Manipulador

Gámez García, Javier; Robertsson, Anders; Gómez Ortega, Juan; Johansson, Rolf

Published in:

XXVI Jornadas de Automática, Alicante, Spain, September 7-10, 2005

2005

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Gámez García, J., Robertsson, A., Gómez Ortega, J., & Johansson, R. (2005). Calibración Automática de un Observador de la Fuerza de Contacto para un Robot Manipulador. In *XXVI Jornadas de Automática, Alicante, Spain, September 7-10, 2005* Alicante, Spain. <http://www.ja2005.ua.es/insc/conftool/uploads/4691-GRAV1.pdf>

Total number of authors:

4

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA DE UN OBSERVADOR DE LA FUERZA DE CONTACTO PARA UN ROBOT MANIPULADOR

Gámez García J.[†], Robertsson A.[‡], Gómez Ortega J.[†], Johansson R.[‡]

[†] Grupo Robótica, Automática y Visión por Computador. Universidad de Jaén, Jaén, España.

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

[‡]Departamento de Control Automático, Universidad de Lund, 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 éste realiza. Normalmente, para poder llevar a cabo este control, se suele colocar 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. Para resolver este problema, en [2] se propuso un observador que utilizaba técnicas de fusión sensorial para integrar las medidas del sensor de fuerza junto a las medidas de un acelerómetro ubicado en la herramienta del robot y así estimar las fuerzas de contacto.

Este artículo presenta un procedimiento versátil y preciso para llevar a cabo de forma automática la calibración del mencionado observador. Para evaluar el compartamiento del estimador obtenido, y por consiguiente, del procedimiento de calibración, éste ha sido utilizado en un lazo de control de impedancia implementado en un robot industrial Stäubli dotado de arquitectura software abierta. Para poder llevar a cabo el lazo de control de fuerza se ha identificado un modelo lineal del robot manipulador.

Palabras clave: Auto-Calibración, Fusión Sensorial, Robots Manipuladores, Control de Fuerza.

1. INTRODUCCIÓN

Tras el avance industrial acaecido en las últimas décadas, los sistemas robóticos se han visto implantados en numerosas células de fabricación flexibles, teniendo estos que trabajar, bien en entornos variables, bien en entornos poco estructurados. Para que el manipulador in-

teraccione de forma efectiva ante el entorno, evitando las perturbaciones y los cambios impredecibles de éste, el robot requiere de una gran cantidad de información obtenida a través de diversos sensores; desafortunadamente, un único sensor no resulta suficiente para presentar información precisa sobre el entorno [12].

Normalmente, el sensor utilizado en el control de fuerza en robots manipuladores consiste en un sistema sensorial ubicado en la muñeca del manipulador. Uno de los inconvenientes que presentan este tipo de sensores radica en que no sólo miden las fuerzas de contacto, sino que también están sujetos a las perturbaciones dinámicas de la herramienta y su carga, es decir, a las fuerzas de inercias que se producen en el elemento final del manipulador.

En este sentido, si el robot se desplaza en el espacio libre, las medidas obtenidas por el sensor de fuerza corresponden íntegramente a las fuerzas de inercia, interfiriendo y disminuyendo el rendimiento del controlador de fuerza.

Para resolver este problema, recientemente se propuso en [2] una nueva aplicación de fusión sensorial que, combinando las informaciones de un sensor de fuerza colocado en la muñeca del robot y de un acelerómetro ubicado en la herramienta, permitía estimar la fuerza de contacto ejercida por el robot manipulador.

En este artículo se propone un procedimiento de calibración automático para el estimador de la fuerza de contacto propuesto en [2] que facilita su implementación en un sistema robótico industrial. Este método ofrece una solución ‘plug-and-play’ para la integración de un acelerómetro dentro de un sistema robótico con el fin de obtener un estimador de la fuerza de contacto con unos requerimientos de velocidad y filtrado óptimos. Las principales ventajas que ofrece este algoritmo 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.

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* [5][6]. 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 el entorno. La relación de impedancia entre la fuerza (F) y la posición (z) utilizada en este caso viene dada por la siguiente ecuación:

$$F(t) = K_z z(t) + D_z \dot{z}(t) \quad (1)$$

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 $Z(s)$ (Eq. 2) converja a cero, podemos controlar el sistema [6].

$$Z(s) = K_z z(s) + D_z s z(s) - F(s) \quad (2)$$

Este artículo se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 se describe la formulación del problema; en la sección 3 se desarrolla el procedimiento de calibración automático mientras que en la sección 4 se describe la plataforma de experimentación. En la sección 5 se presenta el modelado e identificación del sistema. El apartado 6 muestra algunos de los resultados obtenidos en los experimentos llevados a cabo. Finalmente, en la sección 7 se muestran las conclusiones obtenidas.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1. INTERACCIÓN DEL ROBOT

En el momento en el que el robot entra en contacto con la superficie de interés (Fig. 1), el sensor de fuerza colocado en la muñeca del robot obtiene, en una única medida, dos clases de fuerza (Eq. 3): la fuerza del entorno o fuerza de contacto (F) y la fuerza de inercia producida por la aceleración ($m\ddot{z}$)

$$u = F + m\ddot{z} \quad (3)$$

Normalmente, la realización de la tarea requiere el control de la fuerza de contacto F .

Para obtener F , se pretende la utilización de un observador que, a partir de técnicas de fusión sensorial, estime la fuerza de contacto con unas propiedades de velocidad y filtrado adecuadas.

2.2. 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 al sistema de referencia del sensor de fuerza y del acelerómetro respectivamente. El sistema de referencia origen del sistema viene dado por $O_W X_W Y_W Z_W$

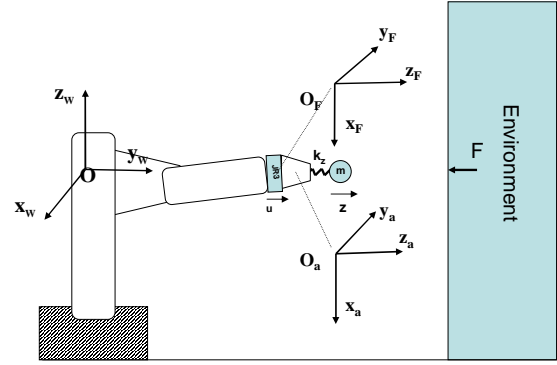


Figura 1: Sistemas de coordenadas del sistema.

y coincide con el sistema de referencia del robot. Para nuestro propósito, el observador de la fuerza de contacto será desarrollado para el eje $O_F Z_F$.

Sea R_F^W la matrix 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 matrix 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 y que

$$R_A^F = I_{3 \times 3} \quad (4)$$

3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN AUTOMÁTICO

La idea básica del procedimiento de auto-calibración es la utilización de una secuencia predefinida de movimientos que nos permitan configurar el observador de la fuerza de contacto. A continuación se describen los parámetros a estimar para dar paso, posteriormente, al desarrollo del procedimiento.

3.1. PARÁMETROS A ESTIMAR

Para llevar a cabo la calibración es necesario identificar los siguientes parámetros:

- *Cálculo de la masa de la herramienta:* para determinar la masa de la herramienta se utilizará el campo gravitacional medido a través del sensor de fuerza.
- *Calibración del acelerómetro:* básicamente, los procedimientos de calibración de acelerómetros pueden dividirse en dos grupos. El primero de ellos, denominado calibración estática, se basa en el posicionamiento del acelerómetro en diferentes orientaciones del campo gravitacional estimando posteriormente los parámetros no conocidos de la siguiente

ecuación:

$$V_{Z_A} = K_{gain} a_{Z_A} + V_o \quad (5)$$

donde V_{Z_A} es la salida en tensión del sensor de aceleración para el eje $O_A Z_A$, K_{gain} es la sensibilidad del acelerómetro que relaciona la medida en tensión con la aceleración a_{Z_A} medida en ms^{-2} y V_o es el offset del sensor. Por otro lado, el segundo método, utiliza sensores adicionales como giróscopos y a veces incluso sistemas de posicionamiento global [4]. Esta calibración, conocida como calibración dinámica, tiene el inconveniente de requerir sensores externos precisos, y por tanto costosos, para llevar a cabo una buena calibración.

- *Obtención de las ganancias del observador:* En los procesos industriales, las señales de los sensores son normalmente influenciadas tanto por el ruido del entorno como las propias interferencias. En algunos casos, los procedimientos utilizados para filtrar este ruido resultan extremadamente costosos debido, principalmente, a que tanto la información de la señal, como el propio ruido, comparte espectra de frecuencia similares [4].

Con la simple adición del acelerómetro para estimar la fuerza de contacto, el observador resultante tendría demasiado ruido. En este sentido, la solución presentada en [2] reduce este problema pero la selección de las ganancias del observador requiere un compromiso entre el ruido de la señal resultante y la respuesta de éste.

De [2], un observador de la fuerza de contacto (\hat{F}_{Z_F}) con propiedades de filtrado se obtiene como

$$\hat{F} = k_{23} u_{Z_F} - k_{23} m \hat{a} - k_{21} m \tilde{\xi}_1 \quad (6)$$

donde k_{ij} son las ganancias del observador, u_{Z_F} es la medida del sensor de fuerza, m es la masa de la herramienta, ξ es la posición del la herramienta y $\tilde{\xi}$ es el error del estimador de posición. La dinámica del observador viene dada por:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\xi}} = (A - KC)\tilde{\xi} - BF_{Z_F} + KD_u u_{Z_F} - Ky \\ \hat{F}_{Z_F} = F_{Z_F} - m(\beta - \Lambda_0 \tilde{\xi}_1) \end{cases} \quad (7)$$

donde K es la ganancia del observador y la dinámica de la herramienta, donde se han considerado perturbaciones estocásticas, viene dada por [2],

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi + B(u_{X_F} - F_{X_F}) + v_\xi \\ y = C\xi + D_u u_{X_F} + D_F F_{X_F} + v_y \end{cases} \quad (8)$$

con

$$\begin{aligned} E[v_\xi(t) v_\xi^T(\tau)] &= Q(t)\delta(t - \tau); & E[v_\xi(t)] &= 0 \\ E[v_y(t) v_y^T(\tau)] &= R(t)\delta(t - \tau); & E[v_y(t)] &= 0 \\ E[v_\xi(t) v_y^T(\tau)] &= S(t)\delta(t - \tau) = 0; & \text{para todo } t \text{ y } \tau \end{aligned}$$

Suponiendo que los ruidos del sistema v_ξ y v_y son blancos, Gaussianos, de media cero e independientes con matrices de covarianza Q y R respectivamente, la ganancia del observador (K) para el sistema (7) que minimiza la varianza del error de estimación debido al ruido del sistema es calculado como [8]

$$K = PC^T R^{-1} \quad (9)$$

donde la matriz P se obtiene como solución de la siguiente matriz de Ricatti

$$PA^T + AP - PC^T R^{-1} CP + Q = 0 \quad (10)$$

De esta forma, la ganancia del observador calculada utilizando el procedimiento anterior minimiza la varianza del error de estimación pero no la varianza debido a las fuerzas de contacto. Destacar que $k_{23} = 1$ para así cumplir la restricción de la Segunda Ley de Newton impuesta por Eq. (6).

3.2. PROCEDIMIENTO AUTOMÁTICO

El siguiente algoritmo pretende, a partir de cualquier clase 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 (Fig. 2). Considerar que $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$.

1. El robot es situado de forma que $R_F^W = R_{F_1}^W$ siendo

$$R_{F_1}^W = Rot(Y_W, \alpha) Rot(Z_W, \delta) Rot(X_W, \theta) \quad (11)$$

esto es,

$$R_{F_1}^W = \begin{pmatrix} c_\alpha c_\delta & r_{12} & r_{13} \\ s_\delta & c_\delta c_\theta & -c_\delta s_\theta \\ -s_\alpha c_\delta & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (12)$$

donde

$$r_{12} = -c_\alpha s_\delta c_\theta - s_\alpha s_\theta \quad (13)$$

$$r_{13} = c_\alpha s_\delta s_\theta - s_\alpha c_\theta \quad (14)$$

$$r_{32} = s_\alpha s_\delta c_\theta + c_\alpha s_\theta \quad (15)$$

$$r_{33} = -s_\alpha s_\delta s_\theta + c_\alpha c_\theta \quad (16)$$

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 $t_0 = t$.

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

$$u_{Z_F}^y = \frac{1}{(n_{t_1} - n_{t_0})} \sum_{k=n_{t_0}}^{n_{t_1}} u_{Z_F}(k) \quad (17)$$

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

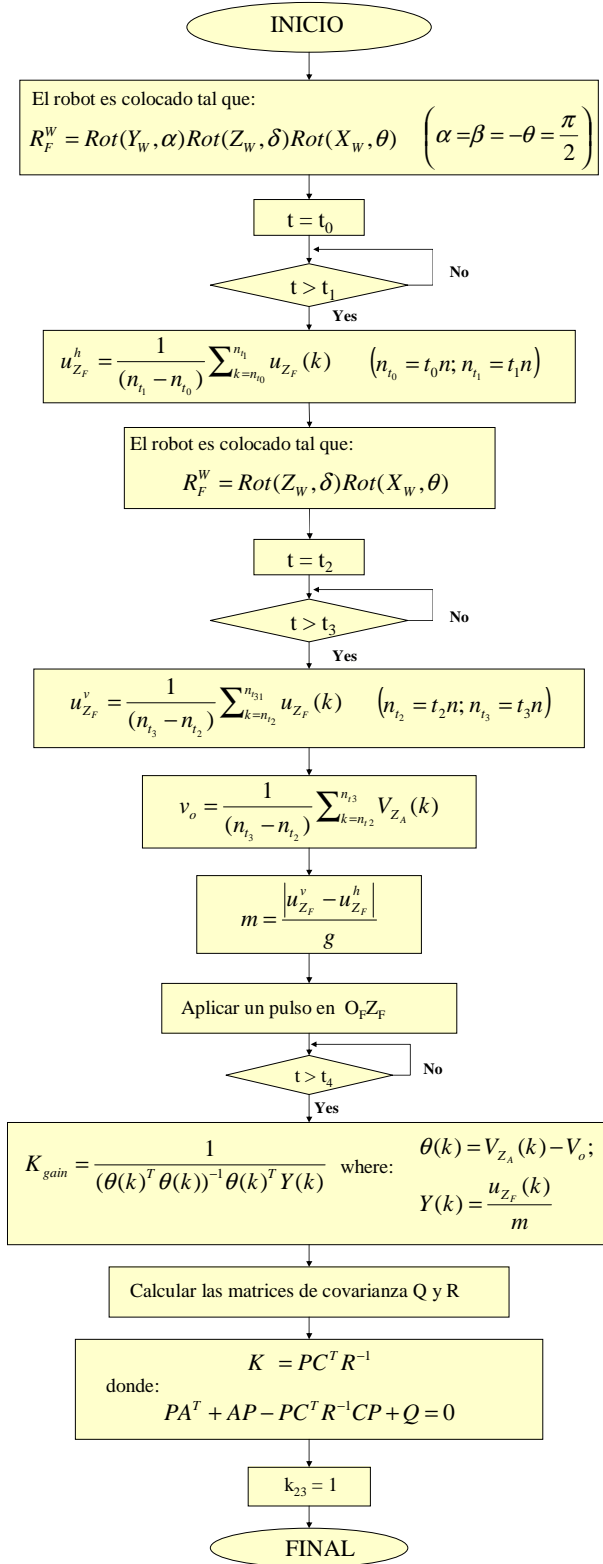


Figura 2: Diagrama de flujo para el procedimiento de calibración automático.

3. El robot es ubicado de forma que $R_F^W = R_{F_3}^W (R_F^W$ para el paso 3) siendo

$$R_{F_3}^W = Rot(Z_W, \delta)Rot(X_W, \theta), \quad (18)$$

esto es,

$$R_{F_3}^W = \begin{pmatrix} c_\delta & -s_\delta c_\theta & s_\delta s_\theta \\ s_\delta & c_\delta c_\theta & -c_\delta s_\theta \\ 0 & s_\theta & c_\theta \end{pmatrix} \quad (19)$$

Establecer $t_2 = t$.

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

$$u_{Z_F}^h = \frac{1}{(n_{t_3} - n_{t_2})} \sum_{k=n_{t_2}}^{n_{t_3}} u_{Z_F}(k) \quad (20)$$

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

5. Calcular el offset del acelerómetro V_o como:

$$V_o = \frac{1}{(n_{t_3} - n_{t_2})} \sum_{k=n_{t_2}}^{n_{t_3}} V_{Z_A}(k) \quad (21)$$

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

6. Calcular la masa (m) como:

$$m = \frac{|u_{Z_F}^v - u_{Z_F}^h|}{g} \quad (22)$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

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

8. Calcular:

$$K_{gain} = \frac{1}{(\theta(k)^T \theta(k))^{-1} \theta(k)^T Y(k)} \quad (23)$$

donde θ y Y son vectores de dimensión $(t_4 - t_3)n$ y

$$\theta(k) = V_{Z_A}(k) - V_o$$

$$Y(k) = \frac{u_{Z_F}(k)}{m}$$

con $(k = t_3 n .. t_4 n)$.

9. Calcular las matrices de covarianza Q y R (Eq. 7).

10. Calcular la ganancia del observador (K) como

$$K = PC^T R^{-1} \quad (24)$$

donde P se obtiene a través de la siguiente ecuación de Ricatti:

$$PA^T + AP - PC^T R^{-1} CP + Q = 0. \quad (25)$$

11. Establecer $k_{23} = 1$.

3.3. 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 el procedimiento dependerá del tiempo que el robot manipulador tarde en llevar a cabo los movimientos además de esperar a que la posición de la herramienta se estabilice.

Para el procedimiento completo aplicado a nuestro sistema Stäbli, nuestro algoritmo requiere en torno a 12 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:

$$N = ((t_1 - t_0) + 2(t_3 - t_2) + (t_4 - t_3))n \quad (26)$$

donde n es el número de muestreos por segundo.

3.4. ANÁLISIS DEL ERROR

Los objetivos que se pretenden conseguir con este análisis del error son [11]:

- Revelar cuales son los factores críticos que influyen en la precisión final del observador.
- Dar pie a diferentes medios para mejorar la precisión.
- Establecer si el procedimiento de calibración automático se ha llevado a cabo de forma apropiada.

Para determinar el error introducido por el estimador de la fuerza de contacto calibrado a partir del procedimiento anterior, considérese inicialmente la ecuación (6). Analizando esta ecuación, se puede observar que cuando el error del estimador de posición converge a cero tenemos

$$\hat{F} = k_{23}u + \mu_u - k_{23}\hat{m}\hat{a} \quad (27)$$

donde \hat{m} y \hat{a} son estimados utilizando el procedimiento de calibración automático y μ_u es el error propio del sensor de fuerza.

En relación a \hat{m} y, teniendo en cuenta que la masa de la herramienta es estimada a partir de los pasos 2 y 4 del procedimiento, el error introducido por \hat{m} puede ser obtenida siguiendo el siguiente razonamiento:

En una situación ideal, la masa de la herramienta (m) se obtiene como

$$m = \frac{R_{F_1}^W u_{F_21} - R_{F_3}^W u_{F_23}}{g} \quad (28)$$

donde u_{z_1} y u_{z_3} son, respectivamente, la fuerzas de la gravedad proyectadas a lo largo del eje $O_F O_Z$ para los pasos 1 y 3 y g es la aceleración de la gravedad. Por otro lado, la masa es estimada realmente (m_e) como

$$m_e = \frac{R_{F_1}^W (u_{F_z} + \mu_u) - R_{F_3}^W (u_{F_z} + \mu_u)}{g} \quad (29)$$

donde ($R_{F_21}^W$) y ($R_{F_23}^W$) son la matrices de rotación (R_F^W) aplicadas en los pasos 1 y 3 respectivamente. Entonces, el error introducido en la estimación de la masa (e_m) es

$$e_m = g^{-1}((R_{F_1}^W - R_{F_21}^W)u_{F_21} - (R_{F_3}^W - R_{F_23}^W)u_{F_23} + R_{F_1}^W \mu_u - R_{F_3}^W \mu_u) \quad (30)$$

En relación a \hat{a} , éste se calcula utilizando la ecuación (5), es decir,

$$a = \frac{V_a - V_o}{K_{gain}} \quad (31)$$

De la ecuación anterior, y aplicando el procedimiento de calibración automático, dos parámetros han de ser estimados: V_o (el offset del acelerómetro) y K_{gain} (la ganancia del acelerómetro).

Con respecto al offset, para identificar el error introducido en su estimación, consideremos inicialmente una situación ideal— i.e., el sistema de coordenadas del acelerómetro está perfectamente alineado con el del sensor de fuerza, que las matrices de rotación corresponde con la de los pasos 1 y 3, y que el ruido del acelerómetro sea cero—teniedo

$$V_o = R_{A_3}^W V_a = R_{F_1}^W V_a \quad (32)$$

donde V_a es la salida en tensión del acelerómetro. Sin embargo, lo que realmente medimos es

$$V_{oe} = R_{A_e3}^W (V_a + \mu_a) \quad (33)$$

donde μ_a es el error (o ruido) del sensor de aceleración y $R_{A_e3}^W$ es la matriz de rotación real aplicada. Entonces, utilizando Eqs. (32) y (33), el error introducido en la estimación del offset es

$$e_o = (R_{F_3}^W - R_{A_e3}^W)V_a + R_{A_e3}^W \mu_a \quad (34)$$

En relación a la ganancia del acelerómetro, para calcular el error introducido en su estimación consideramos inicialmente la situación ideal

$$K_{gain} = \frac{R_{F_3}^W V_a - V_o m}{R_{F_3}^W a m} \quad (35)$$

donde a es la aceleración real (medida en ms^{-2}) calculada a partir de las medidas del sensor de fuerza.

Del paso 8, K_{gain} se estima como

$$\hat{K}_{gain} = \frac{R_{A_e3}^W (V_a + \mu_a) - (V_o + e_o)(m + e_m)}{R_{F_3}^W u_{F_z}} \quad (36)$$

Por otro lado, considerando Eqs. (35) y (36), el error introducido en la estimación de la sensibilidad del acelerómetro utilizando el procedimiento de calibración automático es

$$e_g = [R_{F_3}^W - R_{F_e3}^W u_{F_z} + R_{F_e3}^W \mu_u]^{-1} \cdot [R_{F_3}^W - R_{A_e3}^W V_a + R_{A_e3}^W \mu_a - (V_o m - (V_o m + V_o e_m + e_o m + e_o e_m))] \quad (37)$$

Finalmente, en situación estacionaria, el estimador de la fuerza de contacto, cuyos parámetros han sido calculados utilizando el mencionado procedimiento, se obtiene como:

$$\hat{F} = u_{F_z} + \mu_u - (m + e_m) \frac{V_a + \mu_a - V_o + e_o}{K_{gain} + e_g} \quad (38)$$

Como es obvio, una forma de mejorar la precisión del estimador es hacer que los sistemas de coordenadas del acelerómetro y del sensor de fuerza estén alineados y, además, que $R_{F_2}^W = R_{F_1}^W$ y $R_{F_3}^W = R_{F_3}^W$. Entonces, el error introducido sería

$$\hat{F} = u_{F_z} + \mu_u - \left(m + \frac{R_{F_1}^W \mu_u - R_{F_3}^W \mu_u}{g} \right) \cdot \left(\frac{V_a + \mu_a - (V_o + R_{F_3}^W \mu_a)}{K_{gain} + \gamma_1} \right) \quad (39)$$

siendo

$$\gamma_1 = \frac{R_{F_3}^W \mu_a - (V_o + R_{F_3}^W \mu_a)(m + R_{F_1}^W \mu_u - R_{F_1}^W \mu_u)}{R_{F_3}^W \mu_u} \quad (40)$$

donde, considerando el sistema de referencia global ($O_W X_W Y_W Z_W$) y además del peor caso ($R_{F_1}^W \mu_u - R_{F_3}^W \mu_u = 2\mu_u$ para $O_W X_W Y_W Z_W$), se obtiene

$$\hat{F} = u_{F_z} + \mu_u - \left(m + \frac{2\mu_u}{g} \right) \left(\frac{V_a - V_o + 2\mu_a}{K_{gain} + \gamma_2} \right) \quad (41)$$

donde

$$\gamma_2 = \frac{\mu_a - V_o 2\mu_u - \mu_a m + 2\mu_u \mu_a}{\mu_u} \quad (42)$$

Pudiendo simplificarse como

$$\hat{F} = u_{F_z} + \mu_u - \frac{m(V_a - V_o) + e_a}{K_{gain} + e_b} \quad (43)$$

con

$$e_a = \frac{2m\mu_u + 2V_u V_a + 4\mu_u \mu_a - 2\mu_u V_o}{g}$$

$$e_b = \frac{\mu_a - 2V_o \mu_u - \mu_a m + 2\mu_u \mu_a}{\mu_u}$$

4. PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN

El sistema robot-herramienta está compuesto por los siguientes dispositivos y sensores (Fig. 3): un robot industrial Stäubli; un sensor de fuerza ATI; y finalmente, un acelerómetro [1].

El sistema robótico utilizado para la realización de los experimentos está basado en un robot manipulador Stäubli RX60B ubicado en el Laboratorio del Grupo de Robótica, Automática y Visión por Computador de la



Figura 3: Plataforma Stäubli. Un robot industrial RX60 dotado de arquitectura abierta de control al que se le ha colocado un sensor de fuerza ATI y un acelerómetro en su extremo.

Universidad de Jaén (España). Su característica principal es su arquitectura totalmente abierta, permitiendo la implementación y evaluación de estrategias de control avanzadas. 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 [1].

El sensor de fuerza utilizado ha sido un sensor ATI de 6 grados de libertad situado en la muñeca del robot conectado directamente al controlador a través de una tarjeta de entradas-salidas analógicas. Para simular el peso de una herramienta pesada colocada en el extremo del robot, se ha colocado una serie de pesas de aproximadamente 3 Kg. El acelerómetro consiste en un sensor tipo capacitivo de la marca PCB. Su sensibilidad es de $100mVg^{-1}$ y está situado en el extremo de la herramienta para medir su aceleración. Las señales de éste son medidas, al igual que aquellas del sensor de fuerza, a través de las entradas analógicas del controlador.

Para la construcción del entorno y poder realizar los experimentos, ya sea en espacio libre como espacio restringido, se ha utilizado una pantalla vertical de cartón piedra. La impedancia ha sido controlada en la dirección perpendicular a la pantalla, que se corresponde a su vez con la dirección 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_∞ deberá casi coincidir con z_r , mientras que para un entorno dotado de mucha más rigidez que el robot, el valor de z_∞ coincidirá con z_c [6].

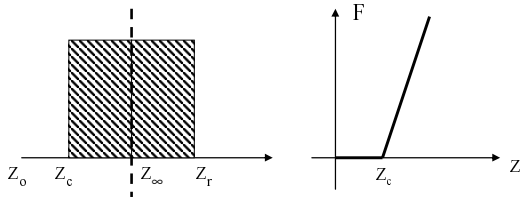


Figura 4: a) Pantalla representando una restricción física donde z_c es la localización de la pantalla en el entorno, z_∞ es la posición en estado estacionario y z_r es la posición deseada en caso de que el desplazamiento ocurra en espacio libre (izquierda). Cuando el robot entra en contacto con el entorno la fuerza de contacto es modelada como un muelle lineal. Sin contacto, la fuerza es igual a cero (derecha).

5. MODELADO E IDENTIFICACIÓN

El modelo utilizado para diseñar el controlador de impedancia ha sido considerado exclusivamente en la dirección del eje z . Para ello 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}). Para ello se ha utilizado el siguiente modelo 'output-error' [7][10]:

$$\mathcal{M} : \quad y_k = \frac{B(q)}{F(q)} u_{k-d} + e_k \quad (44)$$

donde k es el índice de muestreo, q es el operador de desplazamiento unitario (forward shift operator) ($h = 4$ ms), $\{e_k\}$ es un ruido blanco normalmente distribuido. $nb = nf = 3$ y el retardo d es 1.

Para el modelo anterior, los parámetros han sido estimados utilizando el Toolbox de Identificación de Sistemas de Matlab [9]. El modelo resultante ha sido:

$$G_1(q) = \frac{1,2348q^{-1} - 1,5084q^{-2} + 0,3011q^{-3}}{1 - 1,0494q^{-1} + 0,0775q^{-2} - 0,0006q^{-3}} \quad (45)$$

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

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. En este sentido, para hacer que la relación de impedancia propuesta en (2) tienda a cero, se ha utilizado un controlador LQR [6]. Finalmente, la ley de control aplicada ha sido:

$$u = -LX + c\hat{F} + l_r z_r \quad (46)$$

con c correspondiendo a la ganancia de la fuerza en el control de impedancia; \hat{F} la estimación de la fuerza del

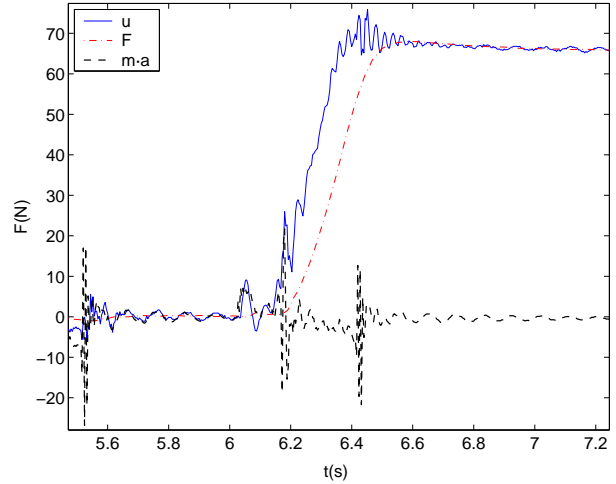


Figura 5: Medida del sensor de fuerza JR3 (u). El robot entra en contacto para $t = 6,2s$. Salida del observador de fuerza (F). Aceleración multiplicada por la masa de la herramienta ($m \cdot a$).

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.

Para estimar la aceleración y velocidad del robot se ha utilizado un observador [3]. En lo que se refiere al observador de fuerza, las ganancias obtenidas han sido: $k_{11} = 0,38$; $k_{12} = 0$; $k_{13} = -0,0073$; $k_{21} = 9,05$; $k_{22} = 0$; $k_{23} = 1$. Mientras que la masa de la herramienta, el offset del acelerómetro y su ganancia han sido respectivamente: $m = 2,81$ Kg; $V_o = 4,78V$ y $K_{gain} = -2,54$

Para el experimento, el controlador ha sido implementado en un robot manipulador con arquitectura software abierta y con un tiempo de muestreo de 4 ms. Los experimentos llevados a cabo han consistido básicamente en tres fases: un movimiento inicial en espacio libre, una fase de transición y por último, un movimiento en espacio restringido. En la figura 5 se muestran la medida tomada por el sensor de fuerza JR3 (u); la salida del observador de fuerza para el mismo experimento (F), obsérvese como el observador elimina el efecto de las fuerzas de inercia de las medidas realizadas por el sensor de fuerza; y, finalmente, la aceleración de la herramienta medida por el acelerómetro y multiplicada por la masa de la herramienta ficticia (izquierda-inferior), destacar el alto nivel de ruido de esta señal debido sobre todo a las oscilaciones a las que se ve sometida la herramienta. La posición z del robot durante este experimento, así como la posición de referencia z_r , se muestra en la figura 6.

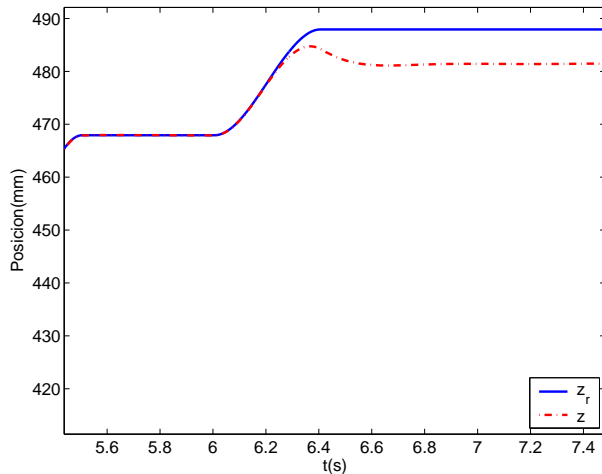


Figura 6: Posición de referencia (z_r) y posición real (z) del robot durante el experimento. Como entrada de fuerza para el algoritmo de control de impedancia se ha considerado la información del observador.

7. CONCLUSIONES

Para estimar apropiadamente la fuerza de contacto en situaciones donde el robot trabaja tanto en espacio libre como en espacio restringido, se desarrolló en [2] 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.

En este trabajo se presenta un algoritmo de calibración automático totalmente autónomo que permite implementar, de forma simple y rápida, esta nueva técnica de fusión sensorial en cualquier sistema robótico. 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.

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.

Referencias

[1] J. Gamez, J. Gomez, M. Gil, and F. R. Rubio. Arquitectura abierta basada en un robot Stäubli rx60.

In *Jornadas de Automática*, pages CD-ROM, September 2003.

- [2] J. Gamez, A. Robertsson, J. Gomez, and R. Johansson. Sensor fusion of force and acceleration for robot force control. In *Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, pages 3009–3014, Sendai, Japan, 2004.
- [3] D. Henriksson. Observer-based impedance control in robotics. Master’s thesis, Dept. Automatic Control, Lund University, Sweden, 2000.
- [4] W. Hernandez. Improving the response of an accelerometer by using optimal filtering. *Sensors and Actuators A: Physical*, 88(3):198–208, January 2001.
- [5] N. Hogan. Impedance control: An approach to manipulation, parts 1-3. *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*. ASME, 107:1–24, 1985.
- [6] R. Johansson and A. Robertsson. Robotic force control using observer-based strict positive real impedance control. In *IEEE Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pages 3686–3691, Taipei, Taiwan, September 2003.
- [7] Rolf Johansson. *System Modeling and Identification*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
- [8] R. E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Trans. ASME- J. of Basic Engineering*, 82:35–45, 1960.
- [9] L. Ljung. *System Identification Toolbox; User’s Guide*. The MathWorks Inc., Natick, MA, 1991.
- [10] L. Ljung. *System Identification - Theory For the User*. 2nd ed, PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 1999.
- [11] R. Y. Tsai and R. K. Lenz. A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand/eye calibration. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 5(3):345–358, June 1989.
- [12] D. Xiao, M. Song, B. K. Ghosh, N. Xi, T. J. Tarn, and Z. Yu. Real-time integration of sensing, planning and control in robotic work-cells. In *Control Engineering Practice*, volume 12(6), pages 653–663, Istanbul, Turkey, June 2004.