

# IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DE UN ROBOT MEDIANTE EL FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO

Humberto Rodríguez, Jaqueline Quintero, Filadelfio Caballero,  
Deyka García  
Universidad Tecnológica de Panamá

Se presenta en este trabajo la aplicación del filtro de Kalman Extendido al problema de identificación de los parámetros dinámicos de un brazo robot de revolución de 5 grados de libertad (GDL). Primeramente, las ecuaciones de estado del manipulador son ampliadas para incluir en el vector de estados los parámetros a identificar, por ejemplo, los momentos y productos de inercia en tres de las articulaciones. Con este modelo de estado, a partir de la medición de los torques (pares) aplicados a las articulaciones y las posiciones y velocidades articulares resultantes se pudieron estimar los parámetros dinámicos mediante el filtrado de las incertidumbres del sistema y de las observaciones. Estas incertidumbres son consideradas como ruido blanco y gaussiano, respectivamente.

En vista de que se utilizan motores de pasos en las articulaciones, la determinación del torque a partir de la medición de la corriente, aunque posible, es mucho más complicada y costosa (por los equipos necesarios y la mayor incertidumbre inherente) que si se utilizasen servomotores dc, que es el caso más usual. Por lo tanto se optó por medir el torque mediante galgas extensométricas adheridas directamente al eje de la articulación. Así, se instaló un puente de

wheatstone completo, se construyó un amplificador de instrumentación y se muestrearon las señales con una tarjeta de adquisición de datos.

Con el fin de simplificar la identificación y reducir la carga computacional, se determinó y utilizó el número mínimo de parámetros inerciales necesarios para modelar la dinámica del robot, esto es, el conjunto base de parámetros inerciales. Luego de estimados los parámetros se compararon contra valores determinados mediante medición directa.

## **Objetivos:**

Este trabajo forma parte de un proyecto más general que consiste en el desarrollo de un entorno para simulación dinámica de robots y de su interacción con otros sistemas, por ejemplo para fabricación flexible. Para que la simulación sea lo más realista posible necesitamos, primero, obtener un buen modelo dinámico del robot.

El modelo dinámico requiere la determinación de diversos parámetros inerciales. Hemos comenzado con la determinación de los parámetros inerciales, pero se incluirán eventualmente los parámetros de rigidez y de fricción también.

## Robot Industrial

La plataforma de experimentación es un robot industrial con 5 articulaciones de revolución, esto es, 5 grados de libertad (GDL), el cual se muestra en la figura 1. Los eslabones son mayormente de aluminio y los actuadores son motores de pasos híbridos. Además, la transmisión de potencia se realiza mediante bandas sincrónicas y cadenas

Para la retroalimentación de posición se utilizan codificadores incrementales y detectores inductivos absolutos.

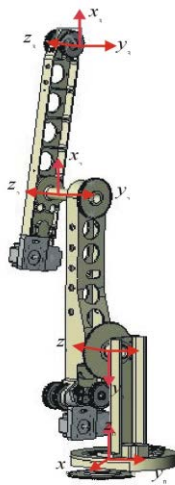


Figura 1. Robot utilizado para experimentación.

El lenguaje de programación es ROBOFORTH. Esta es una versión del FORTH, pero que incluye un paquete de funciones utilizadas en robótica.

## Ecuaciones Dinámicas

Para relacionar los sistemas de coordenadas de cada articulación se utilizaron las matrices de transformación de Denavit-

Hartenberg. Los parámetros que definen estas matrices se muestran en la tabla 1.

Tabla1. Parámetros geométricos del robot Representación de Denavit-Hartenberg

Articulación $i$	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$
1	$90 + q_1$	$-90$	$0$	$d_1$
2	$-90 + q_2$	$0$	$a_2$	$0$
3	$q_3$	$0$	$A_3$	$0$

Las matrices de transformación para una articulación  $i$  de revolución está dada por:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Con la ayuda de estas matrices de transformación las ecuaciones de movimiento se pueden obtener como:

$$\tau(t) = D(q(t))\ddot{q}(t) + h(q(t), \dot{q}(t)) + c(q(t))$$

En donde,

$$D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^n \text{Tr}(U_{jk} J_j U_{ji}^T) \quad i, k = 1, 2, \dots, n; \quad U_{ij} = \frac{\partial {}^0A_i}{\partial q_j}$$

$$c_i = \sum_{j=i}^n (-m_j g U_{ji}^j r_j) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

En estas ecuaciones  $\tau(t)$  es el vector de torques aplicados por los actuadores,  $q(t)$  es el vector de desplazamientos angulares de las

articulaciones,  $J_j$  es el momento de inercia del eslabón  $j$  con respecto a su articulación.

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} q_k \dot{q}_m \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$h_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n \text{Tr}(U_{jkm} J_j U_{ji}^T) \quad i, k, m = 1, 2, \dots, n$$

$D$  es la matriz de inercia,  $h$  es el vector de fuerzas de coriolis y  $c$  el vector de fuerzas gravitatorias.

### Filtro de Kalman

Antes de utilizar el método del Filtro de Kalman, primero se debe aumentar las variables de estado del robot con los parámetros que se desea identificar. En la siguiente ecuación a los desplazamientos y velocidades angulares se le han adicionado los parámetros  $X$ .

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \\ \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1}[\tau - h(q(t), \dot{q}(t)) - c(q(t))] \\ \dot{q} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$z_{k+1} = f(z_k, \tau_k) + \begin{bmatrix} v_k \\ 0_{N_p \times 1} \end{bmatrix}$$

$$f(z_k, \tau_k) = z_k + \dot{z}(z_k, \tau_k) dt$$

$$y_k = C z_k + w_k$$

En donde,  $z_{k+1}$  es la aproximación discreta de  $\dot{z}$ ,  $C$  es la matriz de observaciones. Además,  $v_k$  y  $w_k$  se asumen que son ruido blanco y ruido independiente con media cero (correspondiente a la medición), respectivamente.

El primer paso en el filtrado de Kalman consiste en una *predicción* de las variables de estado para el instante  $k+1$ , mediante

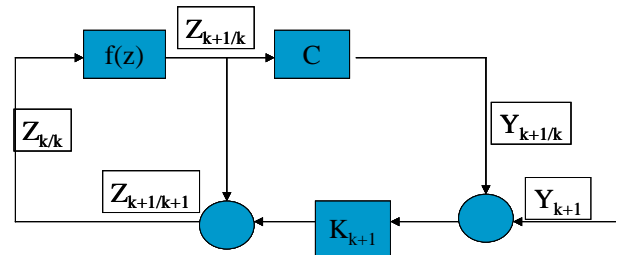


Figura 2. Diagrama conceptual del Filtro de Kalman

evaluación del modelo en el instante  $k$ ,  $z_{k+1/k} = f(z_{k/k})$ , para luego pasar a una *estimación* del error y corrección de la primera predicción,  $z_{k+1/k+1} = z_{k+1/k} + K_{k+1}(y_{k+1} - C z_{k+1/k})$ . Esto se observa gráficamente en la figura 2. Además, el factor de corrección  $K_{k+1}$  se calcula a partir de las matrices de covarianza del error de predicción ( $P_{k+1/k}$ ) y del error de estimación ( $P_{k+1/k+1}$ ). Estos se obtienen como,

$$P_{k+1/k} = F_z(z_{k/k}) P_{k/k} F_z(z_{k/k})^T + Q$$

$$K_{k+1} = P_{k+1/k} C^T [C P_{k+1/k} C^T + R]^{-1}$$

$$P_{k+1/k+1} = P_{k+1/k} - K_{k+1} C P_{k+1/k}$$

En donde  $Q$  y  $R$  son las matrices de covarianza de  $v_k$  y  $w_k$ , respectivamente.

### Medición del torque

En vista de que resultó poco práctico medir el torque a partir de la corriente en los motores de pasos, se utilizó un puente de wheatstone completo con la configuración de galgas mostradas en la figura 3. Esto permitió compensar los cambios térmicos y las

deformaciones no deseadas debido a momentos de flexión.

La ganancia o factor de una galga

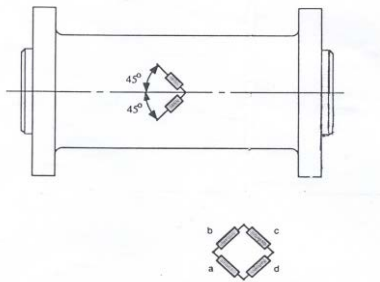


Figura 3. Montaje de la galgas

extensométrica relaciona el cambio de resistencia con la deformación unitaria,

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$$

Además, para la configuración mostrada el cambio en el voltaje de salida del puente como función del cambio de resistencia de la galga y del voltaje de alimentación ( $V$ ), está dado por:

$$\Delta E_0 = V \left( \frac{\Delta R}{R} \right)$$

Las galgas se ubicaron en el eje del eslabón, después de los rodamientos, a excepción de la articulación 1. En esta última se, debido a limitaciones de espacio nos vimos forzados a ubicarlas en el eje de la catarina impulsora de dicha articulación.

La señal de salida de los puentes se amplificó con un amplificador de instrumentación y se muestrearon cada 20 ms con una tarjeta de adquisición de datos, la cual además incorpora un filtro de anti-replicas (antialiasing).

En cuanto a la calibración del sistema de medición de torques, la misma se realizó ajustando las ganancias de los amplificadores y registrando sus voltajes de salida para

diferentes pesos externos aplicados a cada articulación.

Para tener datos lo suficientemente ricos que revelaran la dinámica del robot, se ejecutaron 5 rutas diferentes con diferentes aceleraciones y velocidades, cubriendo buena parte del espacio de trabajo del robot. Los resultados del método de filtrado de Kalman se compararon contra valores determinados mediante medición directa de las dimensiones y algunos se muestran a continuación:

Parámetro (SI)	FKE	Medidos
Jyy1	0.0145	0.0084
Jxx2	0.585	0.567
Jxx3	0.325	0.26
Jyy2	0.021	0.028
Jyy3	0.0014	0.0013
Jzz2	0.0022	0.00136
Jzz3	0.0026	0.0016

### Conclusiones y Trabajos futuros

A partir de los valores calculados y medidos de los momentos y productos de inercia y de masa de los tres eslabones, se determinó que el error medio es de 22%. Este sin embargo es un valor con un alto grado de incertidumbre ya que las mediciones directas no fueron realizadas con instrumentos de precisión. Además, estimamos que la precisión de la identificación puede mejorarse considerablemente si se incluye en el modelo la rigidez de las transmisiones de bandas y de los ejes y si se logra medir el torque directamente en eje de la primera articulación

Otros parámetros importantes que es necesario identificar en un futuro, para tener un modelo adecuado, es la fricción en los rodamientos y en otros elementos.

### **Bibliografía**

1. M. Gautier y W. Khalil, *Direct calculation of minimum set of inertial parameters of serial robots*, IEEE trans. on Robotics and Automation, vol. 6, n° 3, pp.368-372, 1990.
2. R. E. Kalman, *A new approach to linear filtering and prediction problems*, Trans. Of the ASME—Journal of Basic Engineering, vol. 82, Series D, pp 35-45, 1960
3. P. Maybeck, *Stochastic models, estimation, and control, vol.1*, series in mathematics in Science and Engineering, Academic press, 1979.
4. Ph. Pognet y M. Gautier, *Comparison of weighted least squares and extended kalman filtering method for dynamic identification of robots*, Proc. of the IEEE Conf on Robotics and Automation, pp.3622-3627, 2000.