

Construcción y control de posición de un prototipo de brazo robótico de dos grados de libertad

Construction and position control of a robotic arm prototype of two degrees of freedom

Oscar Darío Zabaleta Laverde*

Resumen

La construcción física y el control electrónico del brazo robótico de dos grados de libertad, tiene como punto de partida la aproximación del sistema a las dinámicas de plantas de primer orden, donde a partir de la caracterización de la curva de reacción o comportamiento del brazo robótico, es posible la implementación de controladores PID con el método de sintonización de Ziegler y Nichols, que es sencillo y efectivo para el buen desempeño del prototipo expuesto en el presente artículo. En cuanto a la construcción del brazo robótico, es necesario resaltar el diseño y la implementación del acondicionamiento que requieren los actuadores del prototipo (Motorreductores DC) y los sensores que requiere el brazo (encoders de cuadratura), ya que deben ir acordes con el diseño y la construcción mecánica del brazo robótico, cuya estructura está elaborada en resina que se caracteriza por ser un material liviano y resistente al deterioro. Es necesario resaltar el acople de dos motores DC a la estructura mecánica del brazo robótico, cuya ubicación es indispensable para su correcta movilidad.

Palabras clave

Brazo robótico, controlador PID, lazo abierto y cerrado, actuadores y sensores.

* Grupo de Investigación en Procesamiento de Señales DSP. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. E-mail: oscar.zabaleta@uptc.edu.co

Abstract

The physical construction and electronic control of the robotic arm of two degrees of freedom has as a starting point the approach of the system to the plants dynamics of first order, where from the characterization of reaction curve or behavior of the robotic arm is possible the implementation of PID controllers with Ziegler and Nichols tuning method, that is simple and effective for the good performance of the prototype presented in this article. With regard to the construction of the robotic arm, it is necessary to highlight the design and implementation of the conditioning that requires the actuators of prototype (DC gearmotors) and sensors which requires the arm (squaring encoders), inasmuch as they must be consistent with the design and the mechanical construction of the robotic arm, whose structure is made in resin that is characterized as a lighter material and resistant to decay. It is necessary to highlight the docking of two DC motors to the mechanical structure of the robotic arm, whose location is essential for its proper mobility.

Keywords

Robotic arm, PID controller, open and closed loop, actuators and sensors.

Introducción

El diseño del brazo robótico de dos grados de libertad ha sido implementado en la automatización de procesos industriales con el fin de garantizar al usuario la plena seguridad y eficiencia en el desempeño específico que se desee del robot. El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Academia Militar de los Estados Unidos (Rogers, 2009) ha hecho simulaciones e implementaciones del brazo robótico con el propósito de hacer mejoras al aspecto simulable de la mecánica del robot.

Es de gran importancia resaltar el modelamiento matemático para el diseño y la implementación de un brazo robótico para varios grados de libertad. La Universidad Carnegie Mellon de Estados Unidos expuso en el año 2006 el modelamiento de espacio de estados hiper-redundantes para un brazo robótico de tres grados de libertad (Shammas, Wolf & Choset, 2004), donde se tiene en cuenta la manipulación de variables como la longitud, la masa y el ángulo del brazo robótico, a fin de determinar los puntos de control y estabilidad del sistema. La Universidad Javeriana de Bogotá analiza los efectos de los movimientos de rotación y translación de un brazo robótico mediante la observación matemática en espacio de estados (Martín, Bote & Navarrete, año). Otra implementación interesante para la teoría de control, es la que utiliza microprocesadores, como lo expone la Universidad de Yucatán (Aparicio & Orjuela, 2005), donde por medio del lenguaje ensamblador y programación en Turbo Pascal, es posible la elaboración de una interfaz de usuario para manipular un brazo de tres grados de libertad.

Este manuscrito tiene como objetivo dar a conocer el diseño electrónico para el control de un brazo robótico de dos grados de libertad. Las temáticas se encuentran organizadas de la siguiente forma: en la primera sección se describe la construcción del prototipo del brazo, en la segunda se muestra el diseño electrónico para el funcionamiento del brazo robótico en lazo abierto, en seguida se describe el diseño y la sintonización de los controladores por medio del método de Seglar-Nichos y, por último, se explica el comportamiento de las articulaciones del prototipo a partir de la implementación de los controladores.

La ejecución del proyecto hace parte del análisis de la teoría del control continuo estudiado por profesores y semilleros del grupo DSP, con el fin de comprobar a nivel académico la veracidad del control en procesos de automatización y la capacidad creativa de los semilleros en cuanto a la recursividad para la implementación de sistemas prototipo.

I. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

El prototipo está compuesto por:

- Estructura física.
- Actuadores (motorreductores).
- Sensores (encoders de cuadratura).

Diseño de la plataforma

La estructura física (Fig. 1) está construida con resina, que es un material liviano y resistente a los daños físicos generados por desgaste. Este material presenta una manipulación sencilla que permite moldear las piezas para la construcción del brazo, y, por otra parte, facilita el acople de otras piezas mecánicas y actuadores, que en este caso son los motores.

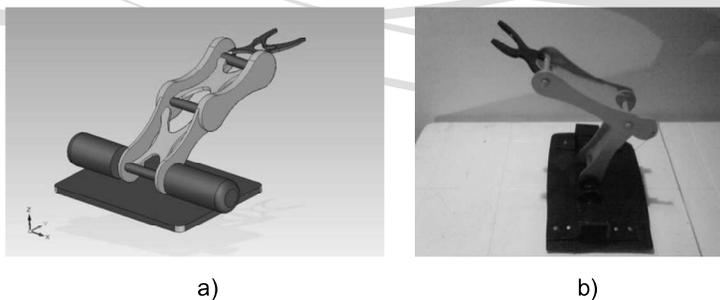


Fig. 1. a) Diseño de la estructura para el brazo robótico de dos grados de libertad elaborado en SOLID EDGE. b) Estructura o sistema materializado del brazo robótico.
Fuente: Zabaleta, D.

El acople de los motores a la mecánica del brazo es indispensable, ya que deben considerarse factores tales como el peso de la estructura y el rozamiento de ejes para los movimientos del brazo.

Los actuadores para la aplicación del control del brazo, son motor-reductores DC de la serie 23420-012CR Faulhaber. Estos motores presentan características técnicas cuyo voltaje nominal es de 12V y torque nominal en la caja reductora de 37.3N/cm, suficiente para movilizar la estructura desarrollada por el semillero del grupo DSP.

Los sensores del prototipo consisten en encoders en cuadratura, que vienen implementados en los motor-reductores, cuya función principal es el censado de los movimientos del brazo. La característica de cuadratura en los encoders permite determinar el sentido de giro del motor, donde dos canales de salida generan pulsos cuyo desfase entre ellos es de 90°.

II. DISEÑO ELECTRÓNICO

A. Acondicionamiento de sensores

La salida de los encoder genera los pulsos cuya frecuencia es dependiente de la velocidad del motor; el sentido de giro es determinado por el detector de cuadratura LS7084, cuya salida es un bit que indica un estado lógico.

El microcontrolador de referencia PIC 16F84A o dispositivo electrónico programable para el control, manipula los pulsos que genera el encoder de cuadratura, y por medio del bit de salida del integrado LS7084, se establece un conteo descendente o ascendente. Posteriormente, la salida por el puerto B del microcontrolador es convertida a niveles de tensión análoga, para compararla con una referencia de voltaje análogo, correspondiente a la articulación del brazo que se vaya a controlar. Esta señal esta acondicionada de 0V (posición inicial en grados) a 5V (posición final en grados).

El circuito se representa en diagrama de bloques en la Figura 2:

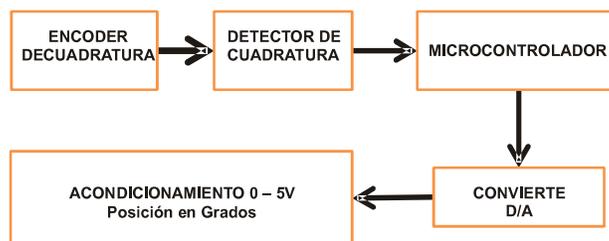


Fig. 2. Diagrama de bloques del acondicionamiento.

Fuente: Zabaleta, D.

B. Etapa de potencia

Después de hacer la comparación de la salida análoga del sensor (encoder de cuadratura) y la referencia, se genera un error dado por el circuito sumador restador, a la vez, debe garantizarse que el error sea positivo por medio del circuito de valor absoluto. El error es comparado con un circuito generador de rampa, y así se obtiene una señal PWM, cuyo ancho de pulso es determinado por la magnitud del error. Esta señal PWM permite que el motor varíe su velocidad, y por medio de una lógica combinacional dirigida al puente H, se define el sentido de giro del actuador.

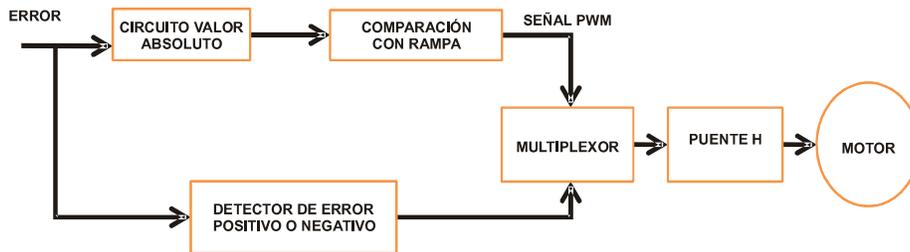


Fig.3 Diagrama de bloques de la etapa de potencia.
Fuente: Zabaleta, D.

III. Modelamiento de las articulaciones del prototipo

El modelamiento se hace a partir de la caracterización de la curva de reacción de cada articulación. Para lograrlo, se aplica una señal escalón de voltaje a la referencia de una de las articulaciones y, como se muestra en la Figura 4, el sensor genera la señal encargada de seguir la referencia, es decir, se obtiene el comportamiento de una articulación del brazo robot a partir del voltaje generado por el sensor en función del tiempo.

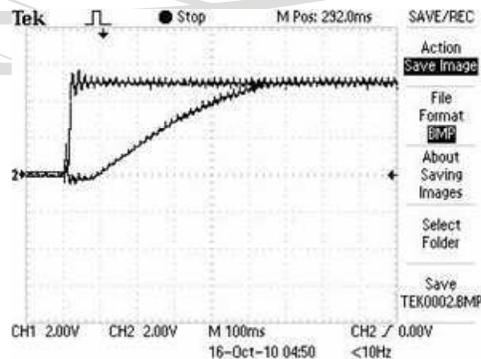


Fig.4. Curva de reacción obtenida en el laboratorio que describe el comportamiento del brazo para su posterior modelamiento.
Fuente: Zabaleta, D.

Tabla I. Constantes para los controladores en la articulación Base y codo, a partir del método de Ziegler y Nochols

Parámetro	Articulación Base	Articulación en Codo
K_c	2.289	8.04
K_i	3.05	3.37

Fuente: Zabaleta, D.

Con el método de los dos puntos, se establece el T y el tiempo muerto (t_m), dando origen a la función de transferencia de cada articulación del brazo robótico de dos grados de libertad, mostradas a continuación en las ecuaciones 1 y 2, para las articulaciones de base y codo respectivamente:

$$G(S) = \frac{e^{-0.092s}}{0.234s + 1} \quad (1)$$

$$G(S) = \frac{e^{-0.08s}}{0.795s + 1} \quad (2)$$

IV. Diseño de controladores para el brazo robótico de dos grados de libertad

A partir de las funciones de transferencia obtenidas del modelamiento en las articulaciones del brazo, es necesario diseñar los controladores, cuyo propósito es hacer que la planta tenga la habilidad de perseguir la referencia ante señales de perturbación. Por medio del método de Ziegler y Nichols (Alfaro, 2005) y con ayuda de las funciones de transferencia dadas por el modelamiento de las plantas en las articulaciones del brazo robótico, es posible diseñar los controladores PI a partir de las ecuaciones 3, 4 y 5.

$$k_c = 0.9 \frac{\sigma}{k_p T_m} \quad (3)$$

$$T_i = 3.33 T_m \quad (4)$$

$$k_i = \frac{k_p}{T_i} \quad (5)$$

Donde k_c es la ganancia del circuito proporcional, k_i la ganancia del circuito integral, y k_p la ganancia generada por la planta con respecto a la referencia, que para este caso es igual a 1. En la Tabla I se observa un resumen del cálculo de los coeficientes para los controladores PI.

Con el fin de dar seguridad a la calidad del diseño de los controladores, se efectuaron las respectivas simulaciones, elaboradas por Simulink desde la plataforma virtual de MATLAB 7.7.0 (R2008b), para cada uno de los actuadores.

Para la articulación de la base, se implementa el diagrama de bloques en Simulink, como se muestra en la Figura 5.

Como resultado, se observa que el sensor de la base (encoder de cuadratura) sigue a la referencia en el dominio del tiempo (Fig. 6) con ayuda del controlador PI diseñado.

De igual manera, la articulación del codo se implementa con el diagrama de bloques en Simulink, como se muestra en la Figura 7.

Como es de esperarse, el sensor del codo sigue la referencia en el dominio del tiempo (Fig. 8) con ayuda del controlador PI diseñado, de la Tabla I.

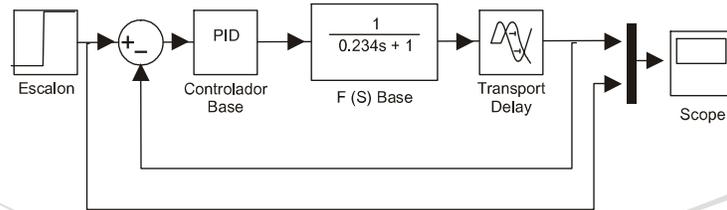


Fig. 5. Diagrama de bloques generado en Simulink para el controlador de la base.

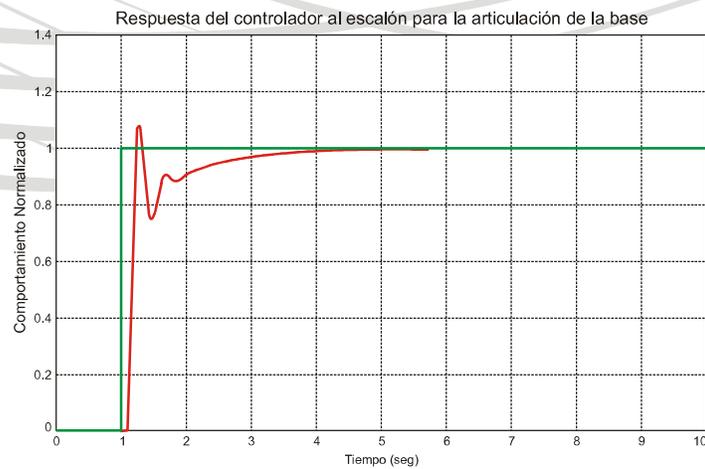


Fig. 6. Respuesta del controlador al escalón para la articulación base obtenida en Simulink.

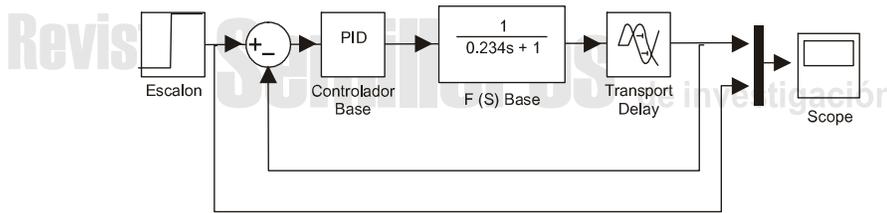


Fig. 7. Diagrama de bloques para el controlador de la articulación codo.

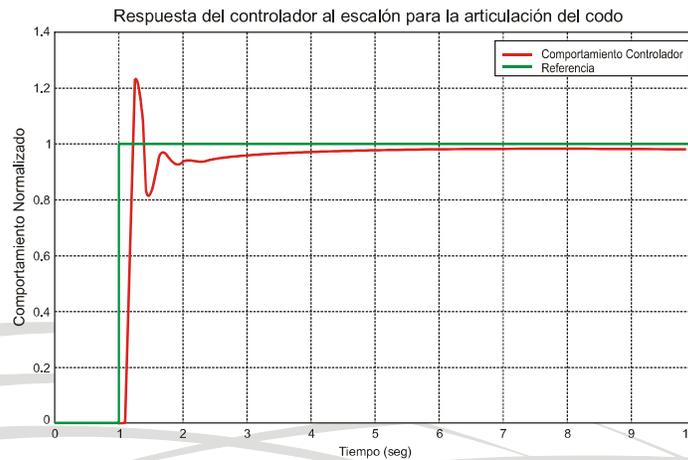


Fig. 8. Respuesta del controlador al escalón para la articulación codo obtenida en Simulink.

VI. RESULTADOS

De la misma manera que en las simulaciones, se implementan los controladores de las articulaciones del brazo robótico, cuya función es mantener estable el comportamiento del brazo y seguir lo mejor posible la señal de referencia. En la Figura 9 se observa el comportamiento de la articulación de la base ante la señal de referencia, e igual que en la simulación (Fig. 6), el sobrepico generado por la señal del controlador es mínimo, posteriormente el sensor tiende a seguir la señal de referencia.

Igualmente, en la Figura 10 se observa el comportamiento de la articulación del codo ante la señal de referencia, pero en este caso la referencia pasa de su nivel máximo 5V a su nivel de tensión inferior 1.8V, donde el sensor inicialmente tiene un gran sobrepico generado por la parte integral del controlador, lo mismo que en la simulación, pero, posteriormente, el sensor sigue la señal de referencia.

Es posible solucionar el sobrepico mostrado en la Figura 10, calibrando manualmente la parte integral del controlador PI.

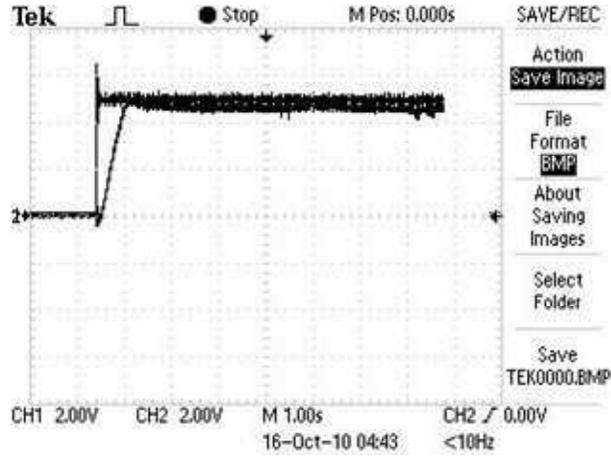


Fig. 9. Seguimiento del sensor a la referencia en conjunto con el controlador de la articulación de la base, obtenida en el laboratorio.

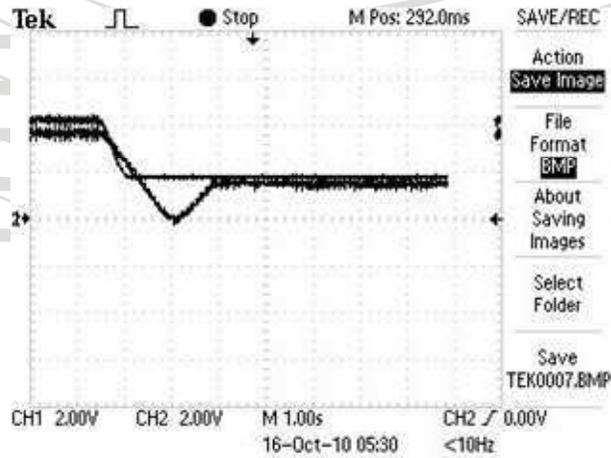


Fig. 10. Seguimiento del sensor a la magnitud de la referencia para la articulación de codo, obtenida en el laboratorio.

VII. CONCLUSIONES

La precisión y la resolución digital con las que trabajan los sensores (encoder de cuadratura), tienen un gran impacto sobre el comportamiento del robot, ya que pueden alterar el resultado del error, por tanto, es necesario diseñar un buen acondicionamiento que tenga en cuenta los voltajes de referencia máximo y mínimo que se vayan a utilizar.

El efecto del controlador mostrado en la Figura 10 es consecuencia del diseño de la parte integral del controlador PI, ya que este actúa como un acelerador en la señal mostrada por el sensor.

El diseño de los controladores por medio del método de sintonización de Ziegler–Nichols para el controlador PI, tuvo los resultados esperados, según las simulaciones mostradas en las figuras 6 y 8, además del comportamiento real en el laboratorio.

El proceso de control para el brazo robótico se basa en un sistema redundante, lo que indica que primero se utiliza una ganancia proporcional aumentando la magnitud del error para obtener la curva característica de las articulaciones. Con base en la curva, se diseña la sintonización final del controlador PI.

Lista de referencias

Alfaro, V.M. (2005). *Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Martín, A., Bote, J. & Navarrete, K. (2002). *Diseño y construcción de un brazo robótico de tres grados de libertad. Controlado desde una computadora PC*. México: Universidad Autónoma de Yucatán.

Shammas, E., Wolf, A. & Choset, H. (2004). *Three degrees-of-freedom joint for spatial hyper-redundant robots*. Pittsburgh, USA: Carnegie Mellon University.

Rogers, J. (2009). *Low-cost teleoperable robotic arm*. New York: Department of Civil and Mechanical Engineering, United States Military Academy.

Aparicio, M. & Orjuela, J. C. (2005). *Control para un brazo robot colocado sobre la plataforma móvil "Úrsula"*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.