

Identificación de parámetros de un sistema de dos masas basado en la adquisición de datos con FPGA

Sergio Alberto Calzada Martínez¹, Manuel de Jesús Nandayapa Alfaro¹,
Ángel Flores Abad¹, Osslán Osiris Vergara Villegas¹

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

Cuando se tiene un sistema dinámico complejo es muy difícil poder modelar el sistema en forma matemática. Sin embargo, la herramienta conocida como identificación del sistema ayuda a estimar los parámetros del sistema dinámico utilizando los datos capturados de una señal de entrada y la señal de salida. La adquisición de datos juega un papel fundamental para poder obtener una buena estimación de los parámetros y poder definir una estrategia de control en base a los resultados.

Palabras clave: Identificación del sistema, Estimación de la velocidad, FPGA, Codificador incremental, Señal de barrido sinusoidal.

Introducción

En la actualidad, cuando se diseña o modela un sistema dinámico muchas veces resulta ser complejo determinar su comportamiento a un estímulo o perturbación. Por lo que es frecuente desconocer los parámetros de sus elementos una vez que se encuentran ensamblados e interactuando para conformar el sistema completo. Por otra parte, las herramientas para modelar un sistema pueden ser partiendo completamente de un análisis matemático donde se involucra la cinemática y la dinámica del mismo. Sin embargo, si el sistema es complejo puede ser difícil encontrar el modelo adecuado del sistema. La identificación del sistema es una herramienta que ayuda a obtener o verificar

el modelo de un sistema dinámico con ayuda de datos obtenidos de la medición de una señal de estímulo y una señal de salida del comportamiento del sistema.

Para la captura de datos, generalmente se utilizan dispositivos que convierten las señales de voltaje o corriente en señales digitales, con ayuda de computadoras y procesadores, se pueden interpretar los fenómenos físicos medidos para el fin que sea necesario. Algunos de estos dispositivos son los Arreglos de Compuertas Programables en Campo (FPGA, por sus siglas en inglés). Los FPGA son chips reprogramables, que ofrecen altas

velocidades de procesamiento, reconfiguración física de las compuertas lógicas y bloques de memoria, entre otros beneficios.

La captura de datos y el procesamiento de los mismos son tareas fundamentales para la identificación del sistema, un error en esta etapa de la identificación puede llevar a grandes errores y a la estimación de un modelo erróneo que no representa el comportamiento dinámico del sistema y también se puede plantear una estrategia de control equivocada.

Antecedentes

A continuación se presentan trabajos que se han realizado en los últimos años y se consideran de gran aporte para este proyecto.

Saarakkala y Hinkkanen (2013), presentaron un procedimiento de identificación del sistema para la estimación de los parámetros de un modelo de dos masas, en ese caso el sistema tuvo una frecuencia de resonancia mecánica que sobrepasaba el ancho de banda del lazo de control del par. Además, al sistema se le implementó un control de lazo cerrado de velocidad y fue manipulado con carga. Se utilizó una señal de entrada llamada Secuencia Binaria Pseudoaleatoria (PRBS, por sus siglas en inglés) y la estimación de los parámetros se obtuvo con el modelado matemático comparado con los datos de especificaciones del fabricante y un análisis estocástico demostraron que el procedimiento logró identificar los parámetros del sistema con un valor de

frecuencia de resonancia mecánica muy grande, conociendo el valor del par de carga.

Posteriormente se realizó la identificación de un sistema mecánico de dos masas (Saarakkala y Hinkkanen, 2014), el cual fue necesario para la puesta en marcha inicial del sistema y el ajuste automático del control de lazo cerrado de velocidad. Para la estimación de los parámetros se aplicó un modelo en tiempo discreto de error de salida (OE, por sus siglas en inglés). En la experimentación se definieron tres formas de identificación de los parámetros, el primero fue a lazo abierto del sistema, los otros dos fueron a lazo cerrado en manera directa e indirecta. Utilizaron una señal PRBS como señal de entrada y se midió la velocidad del motor como salida para la identificación. Se observó que cuando se utiliza la identificación del sistema en forma indirecta con la estructura del modelo OE, la identificación es menos sensitiva a las ganancias seleccionadas del control. Finalmente se concluyó que los métodos de identificación del sistema determinados en este trabajo y utilizados en forma experimental son aplicables para la estimación de los parámetros de un sistema mecánico de dos masas.

En los métodos de estimación de velocidad se encuentra el método N, (Nandayapa et al., 2012), un método implementado para mejorar el control bilateral de un servo-mecanismo, usando como plataforma de procesamiento un FPGA, con la cual se logró un tiempo de procesamiento muy pequeño para los algoritmos de estimación de velocidad y

aceleración. Se confirmó que el método N, utilizando un tiempo de procesamiento corto en el FPGA es adecuado para la estimación de velocidad, donde en conjunto con la posición y la aceleración, fue utilizada como retroalimentación.

Patrascoiu (2011), presentó una solución para la medición de desplazamiento y velocidad angular utilizando instrumentación virtual, en este caso se trata de LabVIEW, la misma solución se propuso para ser utilizada con la medición de desplazamiento y velocidad lineal con ayuda de un codificador incremental. Implementaron un algoritmo llamado Selección de Conteo, y se utilizó para identificar los pulsos del codificador incremental, así como la interpretación de la dirección. El algoritmo se implementó en un ambiente de programación de LabVIEW, se utilizó codificadores de cuadratura y tarjetas de adquisición de datos.

Das y Mahapatra (2013) mostraron la utilización del controlador CompactRIO de National Instruments en la implementación de la temporización en

tiempo real, de la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), de 256 puntos. Implementando la técnica de acceso directo a memoria en el concepto de “primero en entrar – primero en salir” (FIFO DMA, por sus siglas en inglés), para asegurar la transmisión de datos y reducir la latencia se midió el espectro de potencia de una señal sinusoidal, su algoritmo fue programado en el FPGA del CompactRIO y probado a diferentes frecuencias.

Wang et al. (2010), presentaron como el módulo de FPGA del software LabVIEW, el cual puede usarse con lenguajes de descripción del hardware (HDL, por sus siglas en inglés), para programar dispositivos de hardware reconfigurable sin tener conocimiento previo o ser expertos en la programación HDL para FPGA. Los autores mostraron como LabVIEW facilita el diseño de aplicaciones de control de alta velocidad, sincronización y temporización compleja, pruebas de hardware en el circuito (HIL, por sus siglas en inglés), entre otras aplicaciones que demandan alta velocidad de procesamiento.

Metodología

Tomando como base el modelo de dos masas propuesto por Tungpataratanawong (2007), donde el modelo describe la unión flexible de un robot manipulador industrial, se construyó un modelo similar utilizando dos motores de corriente alterna, dos poleas montadas en las flechas de los motores y una banda dentada o de sincronización que es la transmisión de un motor a otro.

Los motores fueron configurados de tal manera, que uno transmite el movimiento al sistema (motriz), y el segundo motor se utiliza sin conexión eléctrica en la parte de potencia a manera de carga y tener una masa simulada del modelo a identificar.

La potencia eléctrica es proporcionada por un controlador para servomotores, que a la vez, recibe un voltaje

de control de -10 a 10 Volts de corriente directa desde el módulo NI-9263 montado en un controlador CompactRIO, el cual tiene una resolución en la salida análoga de 16 bits. El CompactRIO tiene un módulo en tiempo real (RT, por sus siglas en inglés), que se encarga del procesamiento y generación de la señal de excitación del sistema. En el dispositivo CompactRIO se encuentra embebido en el chasis un FPGA Virtex 5 LX50. El FPGA está conformado por bloques de memoria y de compuertas lógicas que configuran los circuitos del hardware para procesar el algoritmo requerido. En este caso en el FPGA se tiene la adquisición de los pulsos del codificador del motor, la estimación de la velocidad y la transferencia de datos hacia la computadora huésped (se conoce en el idioma inglés como Host, término usado en programación de control y adquisición de datos).

En el lado del Host, se inicializan todas las variables, los DMA FIFOs requeridos para la transferencia de datos, se pone el FPGA en modo de espera para la captura de datos y se graban los datos recibidos.

Generación de señal de entrada

Para poder identificar propiamente los parámetros del sistema se requiere una señal de estimulación al sistema. Esta señal debe abarcar todo el rango de operación del sistema, que en este caso el modelo está limitado a 75 Hertz (equivalente a 4500 revoluciones por minuto). Es común en la identificación del sistema utilizar dos tipos de funciones como señales de estimulación: la función PRBS y la función o señal sinusoidal barrida (Swept Sine Signal en

inglés). Se decidió utilizar la señal Swept Sine debido a que es continua en comparación con la PRBS, para este sistema.

Adquisición de Datos y Estimación de Velocidad

En la adquisición de datos es importante conocer las características de la señal a medir, en este caso son señales de un codificador de cuadratura con señales TTL de 5 Volts de corriente directa en los canales A y B. Utilizando un módulo de entradas NI-9401, compatibles con señales TTL, son adquiridas y procesadas en el FPGA, donde se encuentra el algoritmo de estimación de velocidad (Nandayapa et al, 2012), durante el proceso de estimación de la velocidad, se transmiten los datos por medio de un FIFO DMA del FPGA hacia el Host, donde previamente se hizo un espacio en la memoria de acceso aleatorio (RAM, por sus siglas en inglés) en la etapa de inicialización del propio Host. Una vez que se tienen suficientes datos, el Host comienza a procesarlos para grabarlos en un archivo de texto para poder ser visualizado en MATLAB.

Identificación de Parámetros

Los datos adquiridos son cargados en el espacio de trabajo de MATLAB (Workspace, en inglés). Por medio de la herramienta de identificación del sistema de MATLAB, el pre-procesamiento requerido y la selección de un modelado lineal que caracteriza la relación entre los datos de entrada y los datos de salida se obtuvo una estimación del comportamiento del sistema en el dominio de la frecuencia. Lo anterior

permitió la identificación de las frecuencias de resonancia (ω_r) y de anti resonancia (ω_{ar}), las cuales se utilizaron para calcular los parámetros K_s (constante de resorte que describe a la banda de sincronización) y a J_L

(constante del momento de inercia de la carga del sistema). Finalmente, con datos obtenidos se simuló el sistema donde se obtuvo un comportamiento similar al identificado.

Resultados

La señal de entrada al sistema se genera en la parte RT del CompactRIO, donde se usa la función de la señal de barrido sinusoidal (Chirp Waveform Signal en LabVIEW) la cual se envía por medio de un FIFO DMA al FPGA. El tiempo de muestreo es de 100 μ s durante 5 s siguiendo el criterio del teorema de la velocidad de muestreo (Wheeler y Ganji, 2010, p. 102). Una vez que los datos comienzan a ser procesados existe la conversión digital – análogo y se tiene en la tarjeta de salida un voltaje diferencial que es la señal de estimulación en forma de barrido sinusoidal hacia el controlador del motor. El FPGA captura los pulsos del codificador y estima la velocidad con el método N. La transferencia de datos del FPGA al Host, se da por medio de otro FIFO FPGA para no perder ningún dato del experimento (Figura 1).

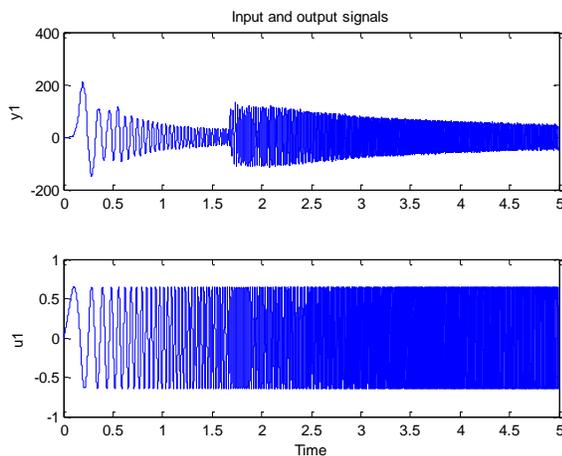


Figura 1. Señales de entrada u_1 y de salida y_1 capturadas por el FPGA

Una vez capturado los datos, se utiliza la herramienta de identificación de parámetros en MATLAB, obteniendo (Figura 2):

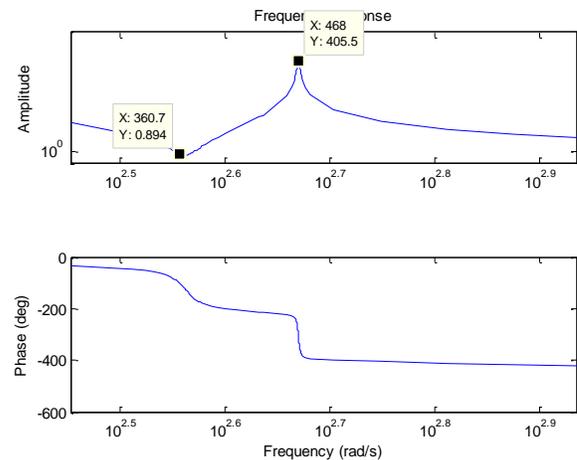


Figura 2. Frecuencias de anti resonancia y resonancia del modelo de dos masas

Con las frecuencias ω_r y ω_{ar} se calcularon los parámetros K_s y J_L del modelo de dos masas (Tungpataratanawong, 2007):

— (1)

(2)

Donde los parámetros J y i son las constantes del momento de inercia del motor y la relación de engranes respectivamente, estos valores se obtienen del fabricante del motor y del acoplamiento mecánico entre las poleas y la banda (Allen Bradley, 1999).

Con estos valores se calculan los parámetros:

Conclusiones

Se implementó un sistema de adquisición de datos utilizando un FPGA Virtex 5 LX50 embebido en un CompactRIO con un controlador RT de National Instruments, con la capacidad de adquirir los pulsos de un codificador de cuadratura y la capacidad de estimar la velocidad en base a los pulsos.

Se obtuvieron las frecuencias de resonancia y anti resonancia del sistema con las cuales se obtienen los parámetros ω_n y ζ . Los parámetros son necesarios para

poder diseñar una estrategia de control teniendo en cuenta las frecuencias de resonancia del sistema y evitar que los componentes sufran desgaste, mejorar la precisión en la velocidad y el control de la velocidad y la aceleración de los motores. Lo anterior es aplicado a un sistema dinámico que tenga una unión flexible equivalente a un modelo de dos masas, tal y como son las uniones de algunos manipuladores industriales.

Referencias

Saarakkala, S. E. & Hinkkanen, M. (2013). Identification of Two-Mass Mechanical Systems in Closed-Loop Speed Control. *IECON 2013- 39th Annual Conference of the IEEE*. 2905, 2910. doi: 10.1109/IECON.2013.6699592.

Saarakkala, S. E. & Hinkkanen, M. (2014). Identification of Two-Mass Mechanical Systems Using Torque Excitation: Design and Experimental Evaluation. *The 2014 International Power*

Electronics Conference. 2489, 2496. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869939.

Nandayapa, M.; Mitsantisuk, C. & Ohishi, K. (2012). Improving bilateral control feedback by using novel velocity and acceleration estimation methods in FPGA. *2012 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. 1, 6. doi: 10.1109/AMC.2012.6197024.

Patrascoiu, N.; Poanta, A.; Tomus, A. & Sochirca, B. (2010). Virtual instrumentation used for displacement and angular speed measurements. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 746, 755.

Das, A. D. & Mahaptra, K. K. (2013). Real-Time Implementation of Fast Fourier Transform (FFT) and Finding the Power Spectrum Using LabVIEW and CompactRIO. *2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies*. 169-173. doi: 10.1109/CSNT.2013.45

Guoqiang, W.; Tran, T. N. & Andrade H. A. (2010). A graphical programming and design environment for FPGA-based hardware. *2010*

International Conference on Field-Programmable Technology. 337-340. doi: 10.1109/FPT.2010.5681433

Tungpataratanawong, S. (2007). *Study on High Performance Motion Control of Industrial Robot Focused on Mechanical Resonance*. (Tesis Doctoral. Universidad de Tecnología de Nagoka. Japón).

Wheeler, A. J. & Ganji, A.R. (2010). *Introduction to Engineering Experimentation*. New Jersey, Estados Unidos de América: Prentice Hall.

Allen Bradley (1999). *Y-Series Brushless Servo Motor Manual*. Winsconsin.