

Control de un Robot Antropomórfico por Medio de una Interfaz con Sensores Articulares

Hernández Rivera Raúl, Reyes Cortés Fernando, Vargas Treviño Ma. Aurora, Vergara Limón Sergio, Palomino Merino Amparo

Grupo de Robótica, Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Av. San Claudio y 18 Sur S/N Edificio 182 C.U., C.P. 72570, Puebla, Pue. MÉXICO
Tel. (222) 2295500, correo electrónico: raulh@ece.buap.mx

Resumen

En este trabajo se describe el diseño y desarrollo de una interfaz humana con sensores articulares para el control de un robot antropomórfico de dos grados de libertad. La interfaz se coloca en la extremidad superior la cual consta: de dos acelerómetros colocados en el extremo final del brazo y antebrazo, y por una tarjeta de adquisición de datos la cual es la encargada de obtener los desplazamientos angulares de la extremidad, así como de realizar el control del robot, esta tarjeta se instrumenta con un FPGA y se comunica a través del bus PCI con la PC. La plataforma que se usa para la visualización y el procesamiento de los datos es LabView.

Por último se presenta el diseño de un algoritmo de control con la metodología de Lyapunov y su aplicación directa en bio-robótica.

Palabras clave: Interfaz humana, PCI, labview, FPGA, acelerómetros, algoritmo de control.

1. Introducción

El uso de robots para diversas áreas de la investigación ha ido en incremento desde una simple manipulación hasta tareas complejas. En la actualidad se han desarrollado diversos mecanismos para controlar sistemas robóticos por medio de diferentes interfaces tales como: los basados en visión, PDA's, Joystick, sistemas remotos o teleoperados (control por internet), tacto y reconocimiento de voz.

Una de las innovaciones importantes, es la aplicación de la robótica en el tratamiento de

rehabilitación en los pacientes con problemas de movilidad en los miembros superiores. Esto debido a la investigación y experimentación de nuevas metodologías, con la utilización de sistemas robóticos que interactúan con el paciente, a fin de complementar y, por lo tanto, hacer más eficaz la intervención del fisioterapeuta, y al mismo tiempo reducir los costos asistenciales.

Este trabajo describe el diseño de una interfaz humana utilizando acelerómetros para manipular las articulaciones de un robot antropomórfico de dos grados de libertad de transmisión directa, el sistema consta de dos partes principalmente: una es la encargada de medir los desplazamientos angulares en la extremidad superior y la otra parte se encarga de realizar el control del robot.

Para el desarrollo del sistema electrónico capaz de medir los desplazamientos angulares del miembro superior se utilizan; dos acelerómetros, una tarjeta de adquisición de datos y una PC para el procesamiento de la información. La tarjeta de adquisición de datos se implementa mediante un FPGA que se comunica vía bus PCI a la PC. La plataforma que se utiliza para la visualización y el procesamiento de los datos es LabView, bajo este ambiente se diseña el software para manipular el robot así como la lectura de los desplazamientos angulares de la extremidad superior, las cuales son las posiciones deseadas de la ley de control. Además se presenta el diseño de un algoritmo de control con la metodología de Lyapunov y su aplicación directa en bio-robótica.

2. Sistema Electrónico para la Interfaz Humana

El sistema electrónico que se desarrollo en este trabajo para medir los desplazamientos angulares se describe en el siguiente diagrama a bloques, figura 1, este sistema consiste de una PC, la tarjeta de adquisición de datos y los inclinómetros.

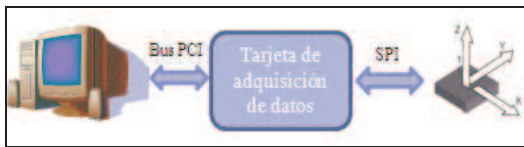


Fig. 1 Diagrama a bloques del sistema electrónico.

El dispositivo para medir los desplazamientos es el ADIS16209, es un inclinómetro digital de alta precisión tiene dos modos de operación; en un solo eje mide $\pm 90^\circ$ y en los dos ejes $\pm 180^\circ$. El voltaje estándar de alimentación es de 3.3 volts con un rango de temperatura de -40°C a $+125^\circ\text{C}$ y se conecta a través de una interfaz serial periférica (SPI), que es soportada por muchas plataformas de hardware digital. Este dispositivo tiene una simple estructura interna de registros que maneja todos los datos de salida y características de configuración. Un LSB es igual a 0.244mg (aceleración) y 0.025° (Inclinación) [1].

La tarjeta de adquisición de datos se implementa mediante un FPGA de la marca Altera que se comunica vía bus PCI a la PC. El FPGA viene con su firmware, el cual se encarga de generar el protocolo de comunicación serial SPI, realizar la transacción segura de los datos, esto es, leer y multiplexar los datos de los dos inclinómetros, además de enviarlos a la PC para ser visualizados y procesados en LabView. Los datos obtenidos son palabras de 16 bits de los cuales 14 pertenecen a la inclinación de los dispositivos.

3. Dinámica del Robot

El modelo dinámico de un robot manipulador puede obtenerse a través de las ecuaciones de Lagrange, cabe mencionar que en ausencia de fricción y otras perturbaciones. La dinámica de un robot serial de n eslabones se describe como [2]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

Donde $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercias, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de fuerzas de Coriolis y

fuerzas centrípetas, $g(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el par gravitacional, $\tau \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el par aplicado y $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ son los vectores de posición, velocidad y aceleración.

A pesar de que la ecuación de movimiento (1) es compleja, posee propiedades fundamentales que al ser explotadas, facilitan el diseño de nuevas leyes de control para robots manipuladores.

Propiedad 1: La matriz $C(q, \dot{q})$ y la derivada con respecto al tiempo de la matriz de inercia $\dot{M}(q)$, cumplen:

$$\dot{q}^T \left[\frac{1}{2} \dot{M}(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{q} = 0 \quad (2)$$

para todo $q, \dot{q} \in \mathbb{R}^n$ [3].

4. Control de Posición

La ley de control que se utilizo para hacer las pruebas y el desarrollo del sistema es un regulador que tiene la siguiente estructura:

$$\tau = K_p \frac{1 - e^{-2\tilde{q}}}{1 + e^{-2\tilde{q}}} - K_v \frac{1 - e^{-2\dot{\tilde{q}}}}{1 + e^{-2\dot{\tilde{q}}}} + g(q) \quad (3),$$

K_p y K_v son las ganancias proporcional y derivativa respectivamente, $\tilde{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el vector del error de posición. A continuación se presenta la demostración de estabilidad.

donde

$$K_p \frac{1 - e^{-2\tilde{q}}}{1 + e^{-2\tilde{q}}} = K_p \begin{bmatrix} \frac{1 - e^{-2\tilde{q}_1}}{1 + e^{-2\tilde{q}_1}} \\ \vdots \\ \frac{1 - e^{-2\tilde{q}_n}}{1 + e^{-2\tilde{q}_n}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

y

$$K_v \frac{1 - e^{-2\dot{\tilde{q}}}}{1 + e^{-2\dot{\tilde{q}}}} = K_v \begin{bmatrix} \frac{1 - e^{-2\dot{\tilde{q}}_1}}{1 + e^{-2\dot{\tilde{q}}_1}} \\ \vdots \\ \frac{1 - e^{-2\dot{\tilde{q}}_n}}{1 + e^{-2\dot{\tilde{q}}_n}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

La ecuación dinámica de lazo cerrado de un robot de n g.d.l. en términos del vector de estado $[q^T \ \dot{q}^T]^T$ está dada:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} [\tau(t) - C(q, \dot{q})\dot{q} - \dot{g}(q)] \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sustituyendo (3) en (7), tenemos:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} \left[K_p \frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}} - K_v \frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}} - C(q, \dot{q})\dot{q} \right] \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para analizar la existencia del punto de equilibrio es necesario considerar que si y sólo si \dot{q} es cero, $-\dot{q}$ y la matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis $C(q, \dot{q})\dot{q}$ son igual a cero. La matriz de inercia $M(q)$ es definida positiva si y sólo si existe su inversa. Finalmente si y sólo si el error de posición \ddot{q} es cero, el producto $K_p \frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}}$ es igual a cero. Por todo lo anterior se deduce que el punto el equilibrio existe y es único.

Para demostrar estabilidad del punto de equilibrio en el sentido de Lyapunov, se propone la siguiente función candidata de Lyapunov.

$$V(\ddot{q}, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \left(\sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}})} + \ddot{q} \right)^T K_p \left(\sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}})} + \ddot{q} \right) \quad (9)$$

donde

$$\sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}})} + \ddot{q} = \begin{bmatrix} \sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}_1})} + \ddot{q}_1 \\ \vdots \\ \sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}_n})} + \ddot{q}_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

Derivando función de Lyapunov.

$$\begin{aligned} \dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) &= \dot{q}^T M(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} \\ &+ 2 \left(\sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}})} + \ddot{q} \right)^T K_p \frac{\left(\frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}} \right)}{2 \left(\sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}})} + \ddot{q} \right)} \dot{q} \end{aligned} \quad (11)$$

Como K_p y $\frac{\left(\frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}} \right)}{\left(\sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}})} + \ddot{q} \right)}$ son matrices diagonales se pueden conmutar quedando de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) &= \dot{q}^T M(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} \\ &+ 2 \left(\sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}})} + \ddot{q} \right)^T \frac{\left(\frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}} \right)}{2 \left(\sqrt{\ln(1 + e^{-2\dot{q}})} + \ddot{q} \right)} K_p \dot{q} \end{aligned} \quad (12)$$

Sustituyendo \ddot{q} por $-\dot{q}$ y \ddot{q} de la ecuación (4) en la ecuación (6).

$$\begin{aligned} \dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) &= \dot{q}^T K_p \frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}} - \dot{q}^T K_v \frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}} \\ &- \dot{q}^T C(q, \dot{q})\dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} - \left(\frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}} \right)^T K_p \dot{q} \end{aligned} \quad (13)$$

Por la propiedad de antisimetría, la resultante es:

$$\dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) = -\dot{q}^T K_v \frac{1 - e^{-2\dot{q}}}{1 + e^{-2\dot{q}}} \leq 0 \quad (14)$$

Lo cual es una función semidefinida negativa globalmente, demostrando que el punto de equilibrio es estable.

La estabilidad asintótica se prueba tomando en cuenta la naturaleza autónoma de la ecuación en lazo cerrado y aplicando el teorema de LaSalle.

El atractor es:

$$\Omega = \left\{ \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n} \mid \dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) = 0 \Leftrightarrow \dot{q} = 0 \wedge \ddot{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1} \right\} \quad (15)$$

el subconjunto

$$\Omega = \left\{ \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n} \mid \dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) = 0 \Leftrightarrow \dot{q} = 0 \wedge \ddot{q} = 0 \right\} \quad (16)$$

Lo que implica

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \ddot{q}(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

Demostrando así que el punto de equilibrio es único y asintóticamente estable.

5. Plataforma Experimental

El sistema desarrollado actúa sobre un robot antropomórfico de dos grados de libertad de transmisión directa, figura 2, el cual se encuentra en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

siendo este mismo lugar en donde fue construido. Cada articulación formada por un motor de transmisión directa con las características mostradas en la tabla 1, donde se muestra también la resolución de los encoders.



Fig. 2 Robot antropomórfico de 3 g.d.l.

En la **Tabla 1** se mencionan las características técnicas de los servomotores.

Tabla 1: Datos técnicos de los servomotores

| Eslabón | Modelo | Torque Nm | Resolución p/rev | Velocidad rps |
|---------|----------|-----------|------------------|---------------|
| Base | DR1060B0 | 60 | 507 904 | 2 |
| Hombro | DR1100E6 | 100 | 614 400 | 2 |
| Codo | DM1004C6 | 4 | 655 360 | 2 |

Nw = Newton-metro, p/rev = Pulsos por revolución, r.p.s. = Revoluciones por segundo.

Se utiliza para el control del robot manipulador una computadora con LabView y la tarjeta de adquisición de datos y control (TAC1) [4] desarrollada por el grupo de robótica de la BUAP.

6. Sistema de Control del Robot a través de la Interfaz Humana

Una vez que ya se han mencionado las etapas de las que consta el sistema de medición de los desplazamientos angulares y la etapa de control, el diagrama a bloques del sistema de control del robot

por medio de una interfaz humana con sensores articulares queda de la siguiente manera, figura 3.

En este sistema primeramente se hace la medición de los desplazamientos angulares del miembro superior, se lee el ángulo de inclinación del brazo y antebrazo. Estos desplazamientos corresponden a las posiciones deseadas para las articulaciones del robot antropomórfico. La tarjeta de adquisición de datos y control (TAC1) [4] incluye el firmware para procesar y calcular la posición del robot a partir de las señales diferenciales que los tres encoders generan; ya teniendo almacenadas estas posiciones el programa en Labview lee dichas posiciones del robot por medio del bus PCI, calcula el error entre las posiciones actuales y las posiciones deseadas y en función de estos errores la ley de control que se encuentra dentro del programa de Labview calcula el par que debe ser aplicado a cada servomotor, después el programa deduce los valores digitales correspondientes a ese par y los manda a escribir a la tarjeta PCI, la cual proporciona estos valores a la tarjeta de acoplamiento de señales que utiliza tres DACs (Digital-to-Analog Converter) de 16 bits para poder producir las tres señales analógicas que son aplicadas a los drivers, y una vez que sea aplicado el par nuevamente se hace la lectura de las posiciones para calcular un nuevo error y volver a generar un nuevo par acorde al nuevo error de posiciones.

Ahora en lo que respecta a los datos que el usuario puede proporcionar al programa de Labview son las ganancias de controlador y el tiempo de ejecución, el algoritmo de control fue desarrollado usando las librerías de tiempo real de LabView. Estas librerías permiten ejecutar un proceso repetitivo en un tiempo estricto. Para este caso el tiempo quedo definido por el periodo de muestreo de 2ms.

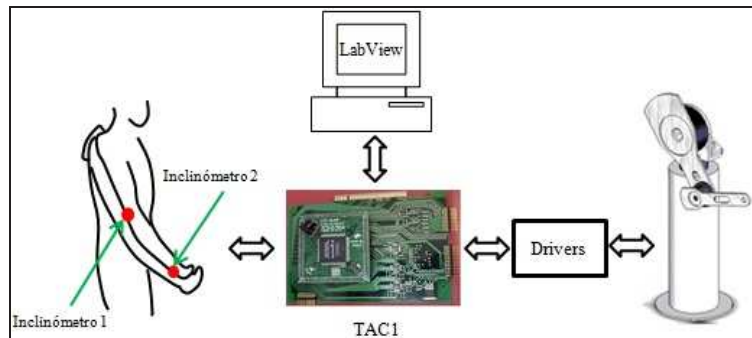


Fig. 3 Diagrama a bloques del control de robot con la interfaz humana.

En la figura 4 se muestran los resultados experimentales después de integrar la interfaz con sensores articulares y cerrar el lazo de control con el robot antropomórfico de dos grados de libertad, en estas imágenes se ilustra como el robot sigue la trayectoria que realiza la extremidad superior. Cabe señalar que el regulador que se utilizó para llevar a cabo estas pruebas es el que se propuso en la sección 3.

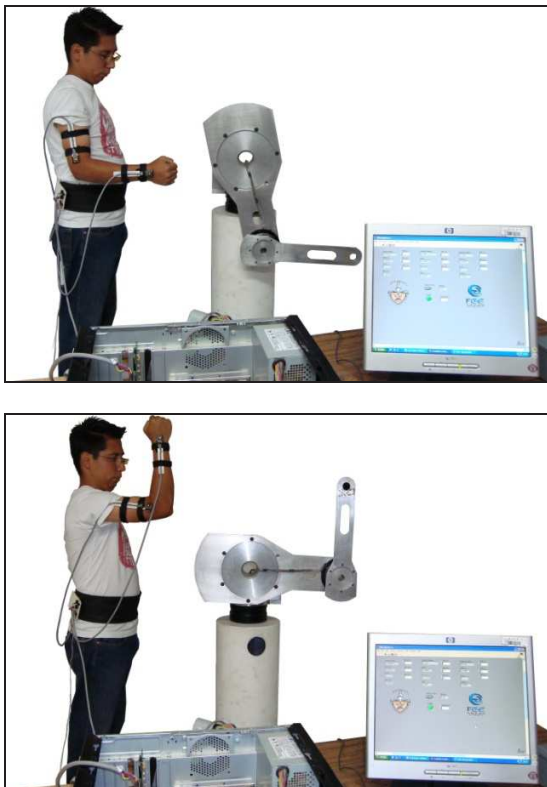


Fig. 4 Resultados Experimentales.

De la evaluación experimental de la interfaz humana con el robot antropomórfico se obtuvieron datos del comportamiento del error de posición y del par aplicado a las articulaciones, esto con el

propósito de mostrar el desempeño del controlador propuesto.

En la figura 5 se observa que el error de posición para el hombro y codo es aceptable dado que el controlador diseñado es de posición y su aplicación es el seguimiento de una trayectoria.

En la figura 6 se muestra el par aplicado para las dos articulaciones hombro y codo, mientras el robot manipulador sigue la trayectoria de la extremidad superior.

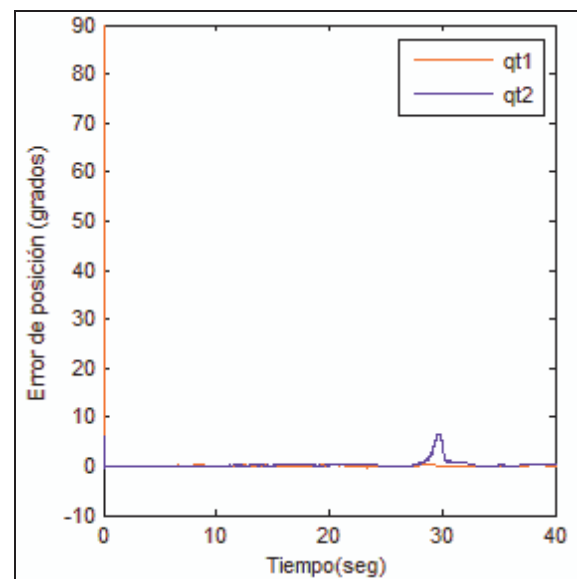


Fig. 5 Error de Posición.

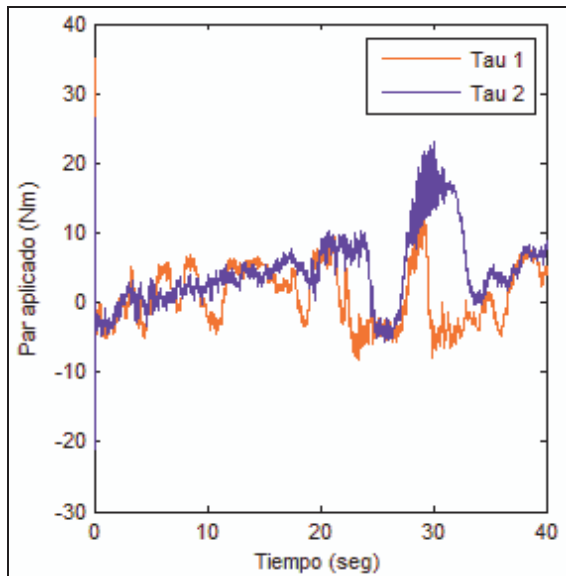


Fig. 6 Par aplicado a los eslabones del robot planar de 2 g.d.l.

7. Conclusiones

Los resultados experimentales llevados a cabo en un robot de dos grados de libertad de transmisión directa muestran el desempeño de la interfaz humana con sensores articulares y el controlador propuesto para el control de posición de robots manipuladores, el cual está soportado por un análisis riguroso de estabilidad.

Con el desarrollo de este trabajo se sientan las bases para que en un futuro se pueda implementar un sistema que interactúe y controle el robot en aplicaciones como: la teleoperación, en exoesqueletos y una de las innovaciones importantes es en el tratamiento de rehabilitación y otro tipo de prácticas médicas encaminadas a mejorar el desempeño de pacientes con problemas de movilidad de las extremidades superiores.

Referencias

- [1] High Accuracy, Dual-Axis Digital Inclinometer and Accelerometer (*ADIS16209*) Datasheet, (Documento_PDF).
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16209.pdf (Revisado Agosto 2009).
- [2] Spong W. and W. Vidyasagar. "*Robot Dynamics and Control*". (John Wiley and Sons). 1989.
- [3] Reyes F. and Guevara E., "*Design of a New Control Algorithm for robots manipulators*", IASTED, Proceedings of the International Conference Circuits, Signals and Systems. Mayo 2003, pp. 118.
- [4] León-Bonilla A., Vergara Limón S., Vargas-Treviño M., Reyes F., "*Tarjeta PCI para control de un robot con tres grados de libertad*", CIINDET, IEEE Sección Morelos y la Asociación Mexicana de Ingenieros y Electricistas A. C., 2006.