

Control de estabilidad de un manipulador planar paralelo 3RRR utilizando redes neuronales

Marcos Villaseñor-Aguilar
Agustín Ramírez-Agundis
José Alfredo Padilla-Medina
Horacio Orozco-Mendoza

Instituto Tecnológico de Celaya
Av. Tecnológico y A. García Cubas s/n, AP 57, CP 38010,
Celaya, Guanajuato.
MEXICO.

correo electrónico (email): electronica@itcelaya.edu.mx
aagundis@itc.mx
alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx
horacio@itc.mx

Recibido el 31 de agosto de 2010; aceptado el 26 de mayo de 2011.

1. Resumen

Este artículo describe el diseño e implementación de un control neuronal que permitió mejorar el desempeño de la estabilidad de un manipulador planar paralelo 3RRR. El robot tiene como característica que utiliza tres servomotores de diferente tamaño, es decir, tiene la capacidad de proporcionar un par diferente para cada articulación. El desempeño del manipulador depende tanto de la configuración de las articulaciones como de los parámetros que utiliza el control proporcional integral (PI) de cada servomotor. El control PI tiene la finalidad de modificar la respuesta del servomotor con base en tres parámetros que son: el de control proporcional de posición (PG), el de control proporcional de velocidad (VG) y el de control integral de velocidad (VI). En el diseño original del manipulador se propusieron valores constantes para cada uno de los parámetros. El propósito de estudio de este trabajo es el establecimiento de estos parámetros mediante el desarrollo de una red neuronal para optimizar la respuesta dinámica del manipulador.

Palabras clave: control por modelo inverso, manipulador paralelo, servomotor, red neuronal.

2. Abstract (Neural Network Based Stability Control for a 3RRR Parallel Planar Manipulator)

This paper presents the design and implementation of a neuronal control. This control allowed getting better stability performance for a 3RRR planar parallel manipulator. The manipulator has as a main feature that uses three servomotors each one with a different capacity; it means that every servomotor provides a different torque for each joint. The performance of the manipulator depends on both, the joint configuration and the parameter values used for the proportional integral control (PI) in each servomotor. PI control has the objective of changing the response of servomotor based on three parameters. These parameters are the position proportional control (PG), the velocity proportional control (VG) and the velocity integral control (VI). In the original design of the manipulator, constant values were used for each parameter. The main purpose of this paper is to study the establishment of these parameters by developing a neural network to optimize the dynamic response of the manipulator.

Key words: inverse model controller, neuronal network, parallel manipulator, servomotor.

3. Introducción

El Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya construyó un manipulador paralelo con finalidad de uso académico y experimental. Su control se realiza únicamente para seguir trayectorias como secuencias de posiciones a través de *Labview*. Las ganancias de los servomotores se ajustaron originalmente a prueba y error. Por lo tanto, el manipulador no opera de manera óptima en cuanto que el control supone una inercia constante del sistema, condición que en la práctica es inviable en cuanto al funcionamiento físico del manipulador. Por lo anterior, los valores de las ganancias o parámetros de velocidad que se tienen en el controlador de cada actuador son incorrectos para ciertas trayectorias que implican mayores esfuerzos, lo que impide programar tareas más demandantes.

El objetivo de este trabajo consiste en optimizar dinámicamente los parámetros de control del manipulador por me-

dio de técnicas basadas en redes neuronales, para obtener la mayor velocidad, sin sobrecarga de los motores, con pesos variables aplicados sobre el elemento efector. El alcance del trabajo consiste en el desarrollo de un sistema de control con base en una red neuronal que genere dinámicamente los valores de los parámetros de control del manipulador para mejorar su desempeño como respuesta a los cambios en la dinámica del sistema.

El control neuronal además realiza el ajuste de la velocidad máxima de los desplazamientos sin sobrecargar a los servomotores. El desarrollo del sistema incluye el diseño y prueba de la instrumentación requerida para adquirir las variables del manipulador más significativas, siendo éstas vibración, corriente y posición del servomotor de menor capacidad. El desarrollo e implementación de la red neuronal se realizó con el Toolbox correspondiente del programa de Matlab. Para la adquisición y procesamiento de señales de la parte de instrumentación se empleó la plataforma Labview 7.1 de *National Instruments*.

4. Manipulador paralelo 3RRR

Un manipulador paralelo 3RRR consiste de una plataforma móvil y una base fija, conectadas por tres cadenas cinemáticas, cada una con tres juntas cinemáticas de revolución (véase figura 1). La razón por la cual se subraya la primera *R* es debido a que las juntas activas, para cada cadena, son las que están conectadas a la plataforma fija, las demás son pasivas. Cada junta de par inferior de revolución permite un grado de libertad. Dos eslabones conectados con una junta de revolu-



Fig. 1. Manipulador paralelo del ITC.

ción forman una junta de pasador rotatoria con cierre de forma. El movimiento de los mecanismos paralelos puede ser restringido por tres diferentes factores: existencia de limitaciones mecánicas sobre las juntas pasivas, interferencia entre eslabones y limitaciones debido a los actuadores.

En el ITC se construyó un manipulador paralelo 3RRR con propósito experimental para casos de estudio en robótica [1].

5. Control del manipulador

Existen diferentes tipos de controles para manipuladores, siendo los de posición y velocidad los más usuales. Este manipulador emplea un control cinemático de posición que lleva el centro de la plataforma móvil a las posiciones que le sean especificadas [2],[3]. Se muestran en la tabla 1 las características del ordenador empleado para controlar el manipulador.

La tarea del sistema de control consiste en situar el centro de la plataforma móvil en posiciones específicas, es decir, un posicionamiento punto a punto. El modo del control del manipulador [4] se muestra en la figura 2, en la que se ilustran los bloques de los componentes que se emplean para controlar los movimientos.

- La interface gráfica GUI es el medio a través del cual se le proporcionan las coordenadas con las cuales se desea posicionar el elemento efector $[X, Y, \phi]$.
- Se tiene un bloque, el cual también es un VI de Labview, es el programa que se utiliza para evaluar la cinemática inversa del manipulador y así realizar los cálculos de los ángulos de las coordenadas articulares.
- Además se maneja otro programa, que permite determinar los grados que se debe mover cada uno de los servomotores del manipulador. Los grados obtenidos para cada eje se le proporcionan a la tarjeta de control de movimientos del manipulador.

Tabla 1. Características del ordenador.

Procesador	Intel Pentium IV
Memoria RAM	256 MB DDR 1
Disco duro	20 GB
Sistema operativo	Windows NT
Plataformas de programación	Labview 7.1 / Matlab R13

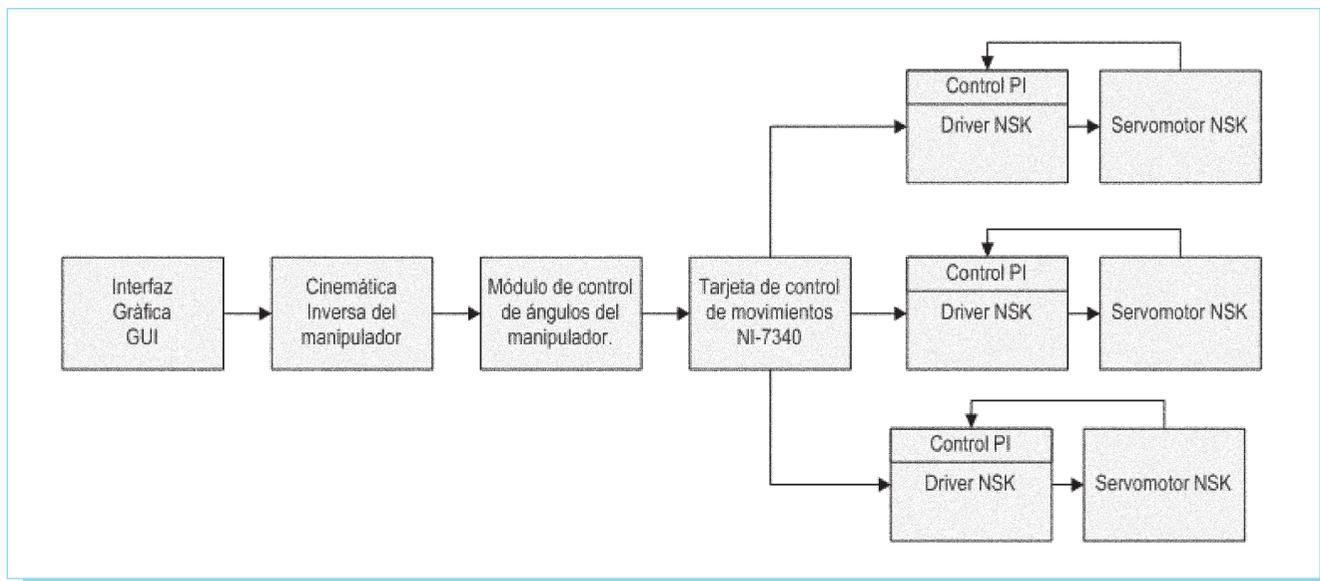


Fig. 2. Esquema del sistema de control integrado.

- La tarjeta de control de movimiento NI-7340 se utiliza para realizar el control de los servomotores en tiempo real, debido a su facilidad para el control de múltiples ejes simultáneos.
- El driver del servomotor NSK recibe el ángulo en grados que debe girar el motor, calcula el número de pulsos que se deben aplicar al servomotor para obtener ese giro y establece el perfil trapezoidal de velocidad. Además, contiene un control para la respuesta del servomotor con base en tres parámetros que son: el de control proporcional de posición (PG), el de control proporcional de velocidad (VG) y el de control integral de velocidad (VI). El propósito de estudio de este artículo es el establecimiento de estos parámetros mediante el desarrollo de una red neuronal para optimizar la respuesta dinámica del manipulador.
- El servomotor ayuda a realizar el posicionamiento del elemento efector, de acuerdo con una cantidad de pulsos que le envíen al driver y la señal control de giro.

6. Parámetros del manipulador

Los servomotores del manipulador operan con base en una serie de parámetros. El uso de esos parámetros permite controlar la respuesta de los servomotores. Los tres parámetros de control son: el de control proporcional de posición (PG), el de control proporcional de velocidad (VG) y el de control integral de velocidad (VI). Adicionalmente, se utiliza el parámetro de la banda

muerta (DBP), el cual permite disminuir las oscilaciones presentes en el servomotor cuando se encuentra estático [5].

Una de las principales características del manipulador es que utiliza tres servomotores de diferentes tamaños y especificaciones. Los tres servomotores son diferentes debido a que el diseño del manipulador está orientado hacia su uso académico y de investigación, empleando las características dinámicas del manipulador. El servomotor *A* (M-YS3040FN501) es el más pequeño de los tres, tiene capacidad de hasta 40 N-m, el servomotor *B* (M-YS4080FN001) es el mediano y proporciona un par de hasta 80 N-m y el servomotor *C* (M-YS5120FN001) es el más grande, con capacidad de hasta 120 N-m [5].

Los parámetros que se presentan en la tabla 2 fueron los que se establecieron en el diseño y puesta en operación del manipulador [4]. Estos parámetros se fijaron con base en prueba y error del funcionamiento del manipulador siguiendo un procedimiento propuesto por el fabricante NSK [5].

Tabla 2. Parámetros ajustados manualmente.

Ganancia	Servomotor A	Servomotor B	Servomotor C
PG	0.1	0.1	0.1
VG	1.0	4.0	4.0
VI	1.5	5.0	8.0

7. Control neuronal por modelo inverso

La técnica del modelo inverso, cuando se utiliza y se ajusta apropiadamente, es una base muy poderosa para el diseño de sistemas de control eficaces [6][7].

El desarrollo de controles empleando redes neuronales es comúnmente utilizado para controlar procesos dinámicos y cambiantes debido a su ventaja en cuanto a que no es necesario conocer el modelo matemático de la planta a controlar, en otras palabras, mapea los datos de entrada y de salida.

El control neuronal por modelo inverso se caracteriza porque la red neuronal (RNA) se utiliza como modelo inverso del proceso a controlar. Es decir, se manejan las salidas del proceso como entradas de la RNA y las entradas del proceso son las salidas de la RNA. Usando el esquema neuronal por modelo inverso se desarrollan controles que proporcionan una respuesta adecuada para el proceso a controlar. De este modo, para el entrenamiento de la RNA, los vectores están formados por las salidas del proceso como entradas de la RNA, y las entradas del proceso como salidas de la RNA [6],[7].

En la figura 3 se muestra el esquema de control neuronal por modelo inverso durante la etapa de entrenamiento. Se puede observar que la salida del proceso y es empleada como entrada de la RNA. La entrada u del proceso es comparada con la salida \tilde{u} de la RNA. Durante el entrenamiento, con el error obtenido por la resta de \tilde{u} y u se realiza el ajuste de los pesos de todas las capas de la RNA mediante el empleo del algoritmo de aprendizaje. El ajuste de los pesos se realiza de manera iterativa con todo el conjunto de entrenamiento para que el control tenga una adecuada respuesta. El aprendizaje de la red depende del conjunto de entrenamiento, entre mayor sea el conjunto de entrenamiento, la red tendrá una mejor respuesta

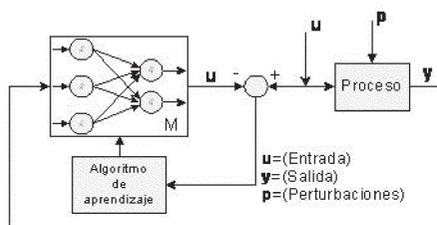


Fig. 3. Esquema de control neuronal por modelo inverso.

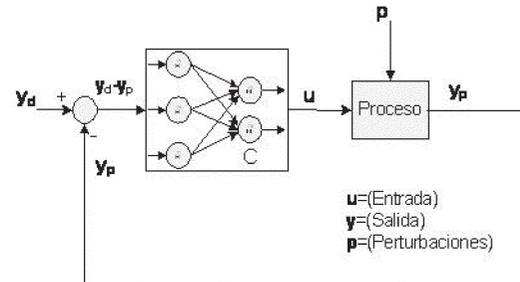


Fig. 4. Control neuronal por modelo inverso.

en cuanto que su comportamiento se asemeja en mayor medida al modelo inverso del proceso.

En la figura 4 se muestra el control neuronal por modelo inverso en la etapa de recall. El control es el obtenido después de completar el entrenamiento de la RNA. El error que se genera al realizar la comparación de la salida deseada y_d y la salida real y_p es utilizado como la entrada de la RNA. Con la diferencia de y_d y y_p , la RNA proporciona la salida u . El control empieza a corregir el error del proceso, con el valor de la salida u , ocasionado por las perturbaciones y con ello se obtendrá una mejor respuesta.

8. Desarrollo

Una de las partes fundamentales para el desarrollo de la red neuronal es el uso del sistema de adquisición y procesamiento de señales.

Para la medición de la corriente, se colocó una resistencia *shunt* de 1Ω en una de las fases del servomotor más pequeño debido a que es el que tiene mayor demanda y exigencia. La conexión de la resistencia permite medir la corriente de la fase del servomotor por medio de la caída de voltaje respectiva.

Para obtener una adecuada medición del voltaje en la resistencia *shunt* fue necesario realizar un acondicionamiento mediante un amplificador de instrumentación. Además, se le agregó a la salida del amplificador de instrumentación un filtro pasabajas con frecuencia de corte de 1 kHz , para suprimir el ruido de alta frecuencia [8-10]. También se utilizó una etapa de aislamiento entre la resistencia *shunt* y el amplificador de instrumentación para protección del amplificador de instrumentación.

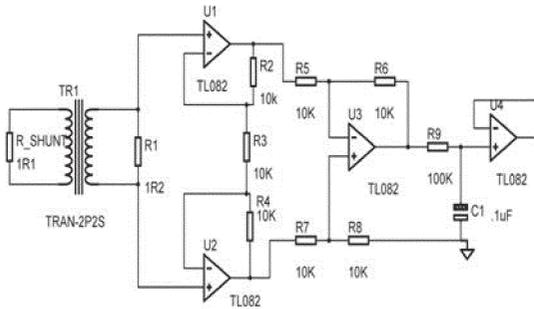


Fig. 5. Circuito para medir la corriente del servomotor.

En la figura 5 se muestra el diagrama esquemático del circuito desarrollado para medir la corriente en una de las fases del servomotor.

El acelerómetro empleado para realizar la medición de las vibraciones es el MMA7361L de *Freescale*, el cual tiene como característica principal que proporciona las vibraciones en los tres ejes coordenados. Contiene una terminal que permite elegir entre dos sensibilidades, siendo éstas 250mV/g y 800mV/g (ésta por omisión). Para obtener el conjunto de entrenamiento de las vibraciones, se utilizó la salida del eje z del acelerómetro (véase figura 6), debido a que es en este eje donde se presenta la mayor sensibilidad a las vibraciones del desplazamiento del manipulador. Este hecho se constató por medio de una serie de pruebas, en las que se monitorearon las señales correspondientes a los tres ejes, observándose que la del eje z es la más significativa, debido a que por la orientación del acelerómetro, es el eje que coincide con el del movimiento de la articulación.

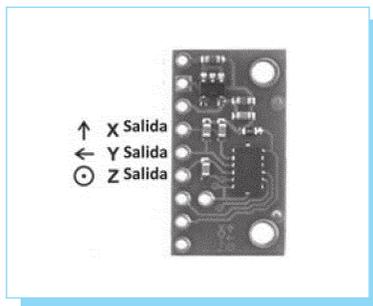


Fig. 6. Orientación de los ejes del acelerómetro.

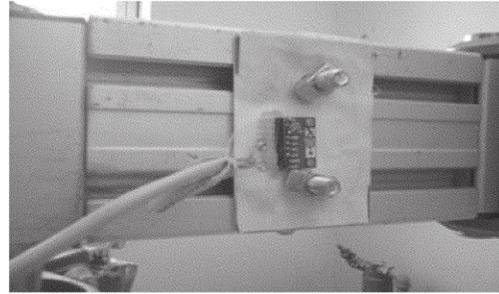


Fig. 7. Montaje del acelerómetro en el manipulador.

El acelerómetro se ubicó en el primer eslabón del manipulador (como se muestra en la figura 7), el cual está conectado directamente al eje del servomotor. Se determinó la colocación del acelerómetro en este punto del manipulador para tener mayor sensibilidad y detectar las pequeñas vibraciones producidas por el sobreesfuerzo del actuador en las posiciones en las que se presenta [11].

Se desarrolló la instrumentación para conocer la posición del servomotor *A* en el transcurso de un movimiento, la que permitió obtener su perfil de velocidad. Con la instrumentación de la posición se logró conocer el comportamiento del manipulador en cada movimiento en relación con las vibraciones y la corriente.

Para conocer la posición del servomotor *A*, se utilizó un potenciómetro lineal de 1 kΩ acoplado sobre una de las juntas activas del manipulador, tal como se muestra en la figura 8.

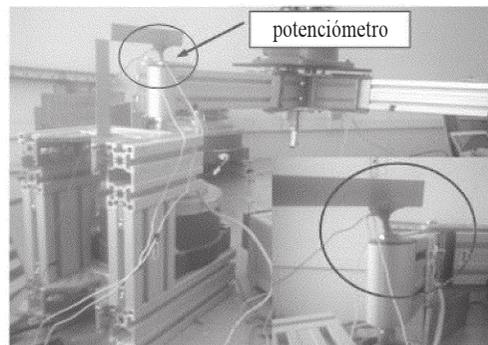


Fig. 8. Montaje del potenciómetro en el manipulador.

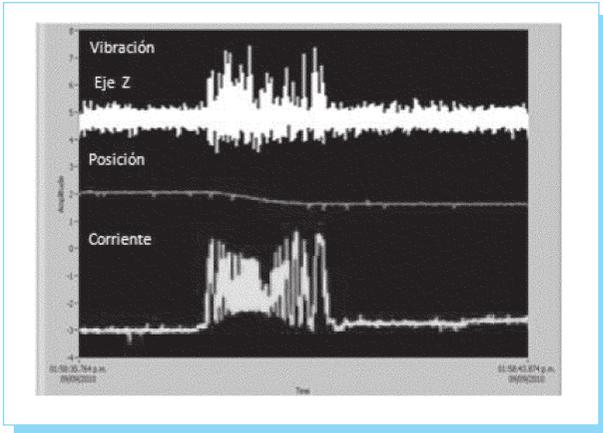


Fig. 9. Interrelación de vibraciones, corriente y posición.

En la figura 9 se observa el comportamiento de la posición, la vibración y la corriente del servomotor en el transcurso del movimiento entre dos puntos.

La mayor vibración ocurre en las zonas de aceleración y desaceleración. Esto se corrobora con la mayor demanda de corriente y con el incremento de la vibración al acelerar y al desacelerar en el transcurso del movimiento del servomotor de un punto a otro. Además, se observa que la vibración y la corriente tienen un comportamiento similar en sus formas de onda.

Para poder leer y almacenar los datos de las diferentes variables se utilizó el módulo de adquisición de datos DAQmx USB 6009 (National Instruments). Se creó un programa en Labview, el cual permite realizar la lectura y procesamiento de la corriente, la vibración y la posición [12].

Se realizaron varias pruebas con el manipulador variando los parámetros PG, VG y VI de los servomotores. Una de las consideraciones que permitió realizar la sintonización de los servomotores fue que los parámetros VG y VI deben tener el mismo valor para los tres servomotores, para que puedan tener la misma respuesta de operación [13],[14]. El parámetro PG debe ser mayor en el servomotor A en comparación con los valores correspondientes al mismo parámetro para los servomotores restantes. Esto con la finalidad de que pueda realizar la corrección debido a su menor capacidad de proporcionar par. Se utilizó el parámetro DBP para reducir las pequeñas oscilaciones en el servomotor A cuando está en una posición fija después de realizar el movimiento. Los parámetros obtenidos para mejorar la respuesta se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros sintonizados.

Ganancia	Servomotor A	Servomotor B	Servomotor C
PG	0.1	0.04	0.04
VG	1.0	1.00	1.00
VI	1.5	1.50	1.50
DPB	1024	0	0

Se propuso un modelo inverso simplificado del manipulador para observar su comportamiento con respecto al uso de diferentes valores del parámetro PG1 del servomotor A. Además se centró la atención en el servomotor A por ser el crítico ya que por su menor capacidad tiene un mayor nivel de exigencia.

En la figura 10 se muestra el modelo inverso para el caso en que las entradas del modelo inverso del manipulador son la corriente y la vibración del servomotor A que conforman el vector y . Como salida se tiene el parámetro PG1 del servomotor A que forma el vector u .

En la figura 11 se muestra la arquitectura de la RNA utilizada como modelo inverso del manipulador. Como se puede observar, la RNA consta de dos unidades en la capa de entrada, una capa oculta y una neurona en la capa de salida. Como se verá más adelante, se experimentó con varias cantidades de neuronas en la capa oculta.

9. Resultados

La red utilizada es un perceptrón multicapa con una sola capa oculta. El algoritmo de entrenamiento utilizado es el de retropropagación. Se seleccionó como función de activación la sigmoideal, por ser la más adecuada para procesar cambios continuos en señales de entrada bipolares.

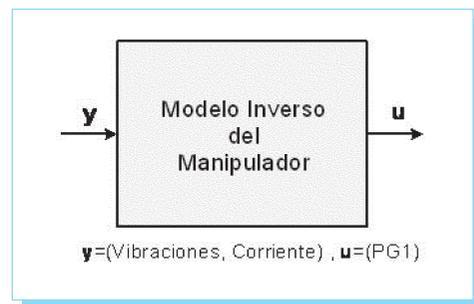


Fig. 10. Modelo inverso propuesto.

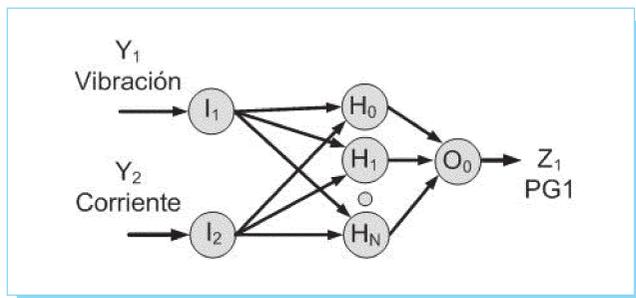


Fig. 11. Arquitectura de la RNA.

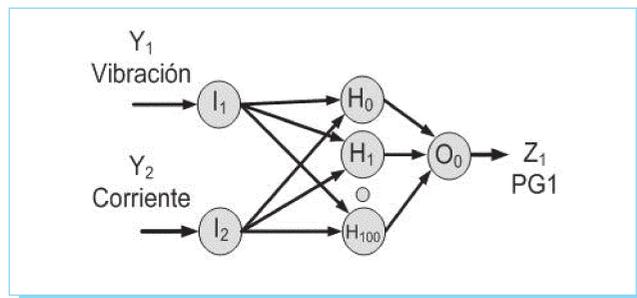


Fig. 12. Arquitectura de la RNA para el control neuronal.

Se diseñaron cuatro variantes para la RNA del modelo inverso del manipulador. La diferencia entre ellas es la cantidad de neuronas en la capa oculta, siendo ésta 25, 50, 100 y 300. Para todas ellas se utilizaron como entradas la vibración y la corriente, y como salida el parámetro PG1 del servomotor *A*. Para el entrenamiento se utilizó una razón de aprendizaje de 0.1 y el método de entrenamiento empleado fue el Levenberg-Marquardt ("trainlm"), que es el que permite la mejor convergencia [15].

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del entrenamiento de las cuatro variantes de la RNA del modelo inverso del manipulador. La RNA de 100 neuronas en la capa oculta es la que se empleó para el desarrollo del control neuronal por modelo inverso. Esta RNA se seleccionó porque tiene la mejor respuesta al entrenamiento, en cuanto a que el error se acerca a la meta propuesta. Otro factor que se consideró para la elección de la RNA es la menor cantidad de neuronas en la capa oculta y el menor tiempo de entrenamiento.

La arquitectura de la RNA utilizada para el desarrollo del control del manipulador se muestra en la figura 12. La RNA tiene

Tabla 4. Resultados del entrenamiento de las diferentes redes.

Neuronas en la capa oculta	Error medio cuadrático	Tiempo de entrenamiento (s)
25	0.195074	1445.55
50	0.136566	2438.69
100	0.000254	4294.46
300	0.000254	9289.46

dos unidades de entradas [X_1, X_2], utiliza una capa oculta con cien neuronas [H_1, \dots, H_{100}], y una neurona de salida [Z_1].

En la tabla 5 se muestran los datos adquiridos correspondientes a la vibración de cada uno de los servomotores al ejecutar la trayectoria seleccionada. En la primera columna se tiene el desplazamiento que realiza cada uno de los servomotores. En la segunda columna se presenta la vibración que ocurre en cada una de las articulaciones del manipulador empleando un valor constante para la ganancia. El valor utilizado para PG en todos los servomotores fue de 0.4, siendo este valor el que se obtuvo como resultado de la sintonización experimental de los parámetros. La tercera columna presenta la vibración de cada una de las articulaciones empleando la ganancia dinámica que proporciona la RNA para el servomotor *A*. La última columna presenta la relación de mejora que se obtiene en la vibración al emplear la ganancia dinámica.

En la tabla 5 se puede observar que el promedio en la columna de la desviación estándar de la vibración empleando el valor constante para el parámetro PG es de 0.58084683. Asimismo, el promedio de la columna de la desviación estándar de la vibración cuando se emplea ganancia dinámica es de 0.44392878. Se puede ver que existe en promedio una mejora de 23.6 %. Comparando ambas columnas también se puede observar la mejora que se obtiene al utilizar la ganancia dinámica para cada uno de los movimientos que conforman la trayectoria seleccionada. Se observa en la tabla 6 que es posible mejorar el desempeño del manipulador con el uso del control neuronal del modelo inverso del manipulador. El empleo de la RNA no mejoró significativamente la corriente exigida por los servomotores, ya que la demanda de corriente depende del punto en el que el manipulador esté posicionado y el par exigido para posicionar el actuador.

Tabla 5. Reducción de vibración.

Actuador	Movimiento	Desviación estándar de la vibración		Relación de mejora de la vibración
		sin RNA	con RNA	
Servomotor A	1-2	0.577760	0.455772	21.11395
	2-3	0.583945	0.454098	22.23616
	3-4	0.592977	0.467833	21.10435
	4-1	0.615536	0.471840	23.34485
Servomotor B	1-2	0.596218	0.483275	18.94323
	2-3	0.597243	0.488526	18.20314
	3-4	0.618668	0.499103	19.32619
	4-1	0.643371	0.483018	24.92387
Servomotor C	1-2	0.534279	0.480377	10.08873
	2-3	0.536761	0.499658	6.912387
	3-4	0.546004	0.046654	91.45524
	4-1	0.527400	0.496990	5.765908
Promedio		0.580846	0.443928	23.61817

39.12% en la vibración. Como síntesis, la estructura de la red neuronal empleada, conjuntamente con la elección del parámetro de control proporcional de posición, ayudó a mejorar significativamente el comportamiento del manipulador en lo que a su estabilidad se refiere.

Los trabajos futuros que se consideran de relevancia son desarrollar una RNA que también realice el modelo inverso del manipulador empleando la corriente y la vibración de cada uno de los tres servomotores. Además se considera que es de relevancia implementar un control de velocidad en tiempo real basado en un FPGA para los tres servomotores del manipulador.

Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico de Celaya por los apoyos prestados para el desarrollo del presente trabajo. Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato por el financiamiento otorgado para el desarrollo del proyecto.

10. Conclusiones

En el desarrollo de este trabajo se propuso un control neuronal que mejorara el desempeño de un manipulador planar paralelo 3RRR. Para el desarrollo del control neuronal fue necesario diseñar la instrumentación y realizar pruebas experimentales sobre el manipulador que permitieran obtener la información del comportamiento de cada uno de los servomotores.

El desarrollo de la instrumentación del manipulador permitió ampliar el conocimiento del comportamiento del manipulador como respuesta a los cambios en los valores de los parámetros de control. Más precisamente, la instrumentación permitió medir la posición, la vibración y la corriente del servomotor en el transcurso del movimiento. Como era de esperarse, la mayor vibración ocurre en las regiones de aceleración y desaceleración del perfil trapezoidal. Con el conocimiento del comportamiento del manipulador se pudo establecer como variables de entrada de la RNA la vibración y la corriente del servomotor, tomando como referencia los valores obtenidos para la varianza en las vibraciones del manipulador, la implementación del modelo inverso simplificado del manipulador con base en una red neuronal redujo la vibración en un 37.46% en todos los servomotores, como valor promedio. Asimismo, mejoró el comportamiento del servomotor de menor capacidad, logrando una reducción de

11. Referencias

- [1] A. J. Richard, "Diseño y construcción de un manipulador híbrido controlado por computadora", tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, México, 2008.
- [2] Kim Pyoung-Ho y Cho Geum-Bae, "A precise control of AC servo motor using neural network PID controller", *Current Science*, vol. 89, núm. 1, julio, 2005, disponible en: <http://www.ias.ac.in/currsci/jul102005/23.pdf>.
- [3] Kumari M. Uttara y B. S. Kariyappa, "FPGA Based Speed Control of AC Servomotor Using Sinusoidal and PWM", *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 8, núm. 10, octubre, 2008, disponible en: www.paper.ijcsns.org/07_book/200810/20081053.pdf.
- [4] S. A. Hariprasad, y R. Nagaraj Kariyappa B. S., "Position Control of an AC Servo Motor using VHDL & FPGA", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 49, núm. 10, enero, 2009, disponible en: <http://www.waset.org/journals/waset/v49/v49-186.pdf>
- [5] NSK, MEGATORQUE® MOTOR SYSTEM User's Manual (ESA23 Driver Unit System), C20053-06.
- [6] Dmitry N. Gerasimov, Hossein Javaherian y Vladimir O. Nikiforov, "Data Driven Inverse-model Control of SI Engines", American Control Conference, julio 2011, disponible en: <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/acc11/data/papers/0195.pdf>

- [7] K.A. Pupkov y N.D. Egupov, *Methods of Robust, Neuro-Fuzzy and Adaptive Control*, Moscow: MSTU named after N.E. Bauman, 2001(en ruso).
- [8] A. Ramírez Agundis, "Diseño y experimentación de un cuantizador vectorial hardware basado en redes neuronales para un sistema de codificación de video", tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2008.
- [9] J. Martínez Nolasco, "Automatización inteligente en procesos industriales utilizando redes neuronales", tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, México, 2009.
- [10] A. Pertence, 'Filtros activos: fundamentos', en *Amplificadores operacionales y filtros activos: Teoría, proyectos y aplicaciones prácticas*, Madrid: Mc-Graw Hill, 1991.
- [11] S. Franco, 'Circuito con retroalimentación resistiva', en *Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos*, 3ª ed., México DF: McGraw Hill, 2005.
- [12] R. F. Coughlin, y F. Driscoll, *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*, 5ª ed., México DF: McGraw Hill, 2004.
- [13] T. E. Álvarez, "Ajuste de parámetros del control de velocidad en un manipulador paralelo mediante un sistema de lógica difusa", tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, México, 2010.
- [14] R. Bishop, *LabVIEW student edition 6i Upper Saddle River.*, New Jersey, USA: Prentice Hall, 2009,
- [15] "The MathWorks", *Neural Networks Toolbox*, 3.6, 2008.

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas
de América Latina y el Caribe,
España y Portugal

758 revistas

16 610 números

205 429 artículos a texto completo

www.redalyc.uaemex.mx