

Diseño de un Controlador Aplicado a la Generación de Pasos en un Robot Caminante

Efren Gorrostieta-Hurtado

Instituto Tecnológico de Querétaro Av. Tecnológico esq.
Escobedo C.P 76150 Santiago de Querétaro, Qro. México.
efren.hurtado@usa.net

Emilio Vargas-Soto

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Unidad de Postgrado
Pie de la Cuesta 702, Col. San Pablo, C.P. 76130 Querétaro, Qro.
emilio@cidesiqueretaro.com

Abstract. En el presente trabajo se muestra el desarrollo del un control PD para la generación de trayectorias de paso en un robot caminante de seis patas. El trabajo esta dividido en tres partes. En la primera parte se muestra el modelo dinámico del sistema mecánico asociado a la articulación del robot, la segunda parte se muestra las alternativas del control donde se analizan dos tipos de control: control PD y neuro PD con compensación de gravedad. Finalmente en la tercera parte se discuten algunos de los resultados obtenidos y se menciona el trabajo por continuar.

I. INTRODUCCIÓN

El diseño del sistema de control en un robot caminante juega un papel importante, la funcionalidad de este se ve reflejado en la eficiencia y forma de caminar del robot, así como en lograr la estabilidad del robot para evitar que se caiga durante su desplazamiento. Muchos de los problemas que se presentan pueden ser resueltos a través de un controlador automático en la locomoción de cada una de las patas del robot. Además del problema de la estabilidad, resulta importante conocer la distribución de las fuerzas durante el caminar y la adaptabilidad del robot cuando se desplaza sobre diferentes tipos de terrenos. Desarrollar un control que nos permita disminuir éste tipo de dificultades es motivo de las investigaciones que se reportan en este documento.



Fig. 1. Configuración del robot caminante.

Nuestra principal atención en el desarrollo del control es obtener la trayectoria definida para cada una de las

articulaciones que conforman la pata del robot, de tal forma que se pueda controlar la velocidad de locomoción del robot. En la Figura 1 se muestra el diseño del robot el cual utiliza una morfología parecida a la de las hormigas [1].

II. MODELO DINAMICO DE UNA ARTICULACIÓN

Para diseñar el control es necesario conocer el modelo dinámico de la pata del robot. Cada articulación del robot consiste en una configuración de tres grados de libertad, esta se puede ver en la Figura 2. Los parámetros utilizados en la modelación son los siguientes: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ son los ángulos relativos entre los eslabones consecutivos que conforman la pata, l_1, l_2 y l_3 las longitudes efectivas de cada eslabón. Consideramos cada eslabón como un cuerpo rígido, m_1, m_2 y m_3 son las masas eslabones 1, 2 y 3, respectivamente. J_1, J_2 y J_3 representan las inercias de los eslabones 1, 2 y 3, respectivamente.

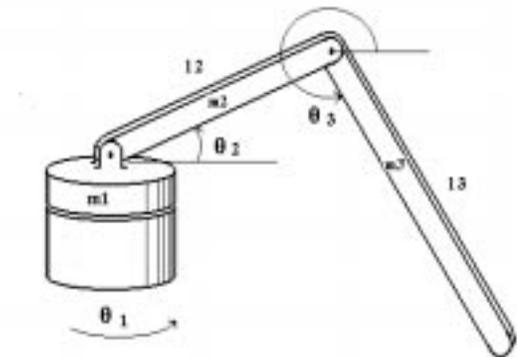


Fig. 2. Parámetros utilizados en el modelo de la pata.

La dinámica de la pata se analizó utilizando el modelo energético Lagrange. La ecuación 1 muestra la relación fundamental entre la energía interna y externa, donde K representa la energía cinética del sistemas mecánico y U representa la energía potencial.

$$L = K - U \quad (1)$$

En la ecuación 2 determina la relación fundamental entre el torque y la fuerza generalizada correspondiente.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_n} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_n} = \tau \quad (2)$$

El modelo matemático para la articulación esta expresado en la ecuación 3, como un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden no lineal .

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & 0 & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} + \dots \\ + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{21} & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \theta_2 \\ \theta_1 \theta_3 \\ \theta_2 \theta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{22} & f_{23} \\ 0 & 0 & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 g \\ m_2 g \\ m_3 g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La ecuación 4 muestra los coeficientes de la matriz de inercia utilizados en la ecuación 3.

$$\begin{aligned} a_{11} &= J_1 + m_3 l_2^2 \cos^2 \theta_2 + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + \frac{1}{4} m_3 l_3^2 \cos^2 \theta_3 \\ a_{22} &= J_2 + \frac{1}{4} l_2 m_2 + l_3 m_3 \\ a_{23} &= \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3) \\ a_{32} &= \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3) \\ a_{33} &= \frac{1}{4} l_3 m_3 + J_3 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b_{21} &= -\frac{1}{2} l_2^2 (m_2 \sin 2\theta_2 + m_3 \sin 2\theta_2) - \frac{1}{4} m_3 l_2 l_3 \cos \theta_3 \sin \theta_2 \\ b_{23} &= \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_3) \\ b_{31} &= \frac{1}{2} m_3 l_3 (l_2 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_2) \\ b_{32} &= \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3) \end{aligned} \quad (5)$$

Los términos de coriolis están definidos por los cuadrados de las velocidades de los ángulos y a la matriz se la combinación de las velocidades de cada uno de los ángulos.

$$\begin{aligned} c_{11} &= -(m_3 l_2^2 \sin 2\theta_2 + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \frac{1}{4} m_3 l_3^2 \sin 2\theta_2) \\ c_{12} &= -(\frac{1}{2} m_3 l_3 l_2 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \frac{1}{2} m_3 l_3^2 \sin 2\theta_3) \\ c_{21} &= \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\cos \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_3) \\ c_{23} &= \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\cos \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_3) \\ c_{33} &= \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_3) \end{aligned} \quad (6)$$

Los coeficientes fij son los términos del efecto gravitacional sobre las masas.

$$\begin{aligned} f_{22} &= \frac{1}{2} l_2 \cos \theta_2 \\ f_{23} &= l_2 \cos \theta_2 \\ f_{33} &= \frac{1}{2} l_3 \cos \theta_3 \end{aligned} \quad (7)$$

Los valores numéricos utilizados en la evaluación de las ecuaciones dinámicas mediante simulación por computadora se muestran en la tabla I

TABLA I

Valores de los parámetros del modelo dinámico			
m_1	0.0126 Kg.	J_1	$1.95 \times 10^{-3} \text{ Kg m}^2$
m_2	0.0226 Kg.	J_2	$2.95 \times 10^{-3} \text{ Kg m}^2$
m_3	0.0153 Kg.	J_3	$1.95 \times 10^{-3} \text{ Kg m}^2$
l_1	0 m	ξ_1	0.03
l_2	0.13 m	ξ_2	0.04
l_3	0.31 m	ξ_3	0.02

III. CONTROL DINAMICO DE LA ARTICULACIÓN

Una vez construido el modelo dinámico, se procedió a implementar dicho modelo para contar con una herramienta que nos permitiera analizar el comportamiento del sistema. Con relación al desarrollo del control, conviene recordar que en el caso de los controles aplicados para robots se presenta una estructura jerárquica de control. En el primer nivel se consideró el control de la cinemática de la pata, esto implica determinar y lograr la posición y la velocidad de las articulaciones de la pata. El resultado logrado es la consecución de los valores cinemáticos en la pata. El siguiente nivel corresponde al control dinámico de la pata. En la figura 3 se muestra el diagrama de bloques de la ley de control. En donde $G(\theta)$ representa el efecto de la gravedad del modelo dinámico de la articulación [2].

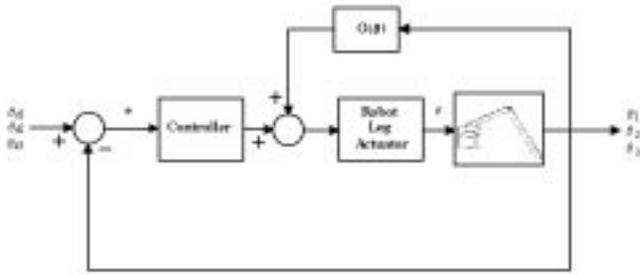


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema de control .

Uno de los controles que se utilizaron para dirigir la articulación es el control proporcional derivativo PD, por lo que en la ley de control es necesario el ajuste de las ganancias proporcionales K y las ganancias derivativas Kd para cada grado de libertad: De esta forma el control de posición que se diseñó, utilizó 6 constantes por sintonizar y 6 constantes para el control de la velocidad

TABLA II

Constantes de control PD para el Control de posición

Constantes	K1	K2	K3	Kd1	Kd2	Kd3
Valores	0.06	0.09	0.2	0.009	0.6	0.01

TABLA III

Constantes de control PD para el Control de Velocidad

Constantes	K1	K2	K3	Kd1	Kd2	Kd3
Valores	0.04	0.9	0.17	0.001	0.2	0.02

Los valores de los parámetros de control PD para el control de la posición de la articulación se observan en la tabla II, estos valores permitieron un seguimiento de los puntos requeridos por el generador de trayectoria previamente definido para la construcción del paso. En la tabla III se muestran los valores de las constantes del control PD para cumplir con el perfil de velocidad también previamente determinado.

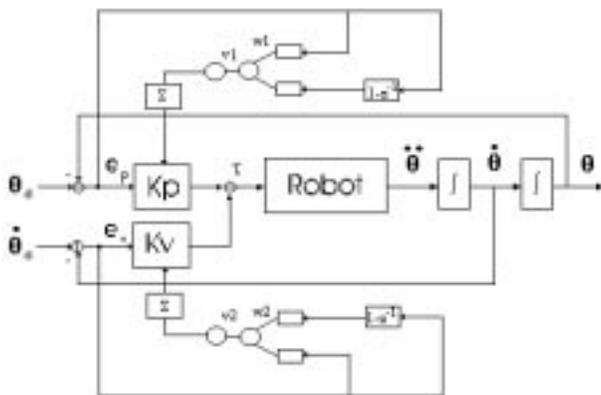


Fig. 4 Diagrama de bloques de un control neuro PD

Debido a la no linealidad del sistema, el control PD presenta algunas desviaciones en el seguimiento tanto de la trayectoria de posición como de velocidad. Una de las alternativas que proponemos para mejorar el control es incluir un control neuronal como se muestra en la figura 4. Este control va determinando las constantes de la ley de control mediante el aprendizaje de la red neuronal. Los valores de las Tablas IV y V muestran los valores finales del control.

TABLA IV

Constantes de control Neuro PD para el Control de posición

Constantes	K1	K2	K3	Kd1	Kd2	Kd3
Valores	0.071	0.301	0.181	0.01	0.011	0.007

TABLA V

Constantes de control Neuro PD para el Control de Velocidad

Constantes	K1	K2	K3	Kd1	Kd2	Kd3
Valores	0.053	1.702	0.183	0.014	0.022	0.023

En resumen los valores generados por la red nos permiten llevar las variables de salida muy suavemente hacia el valor deseado tratando de evitar que la variable de salida sobrepase el valor deseado así como evitar cualquier oscilación de tal forma que estos valores cumplen con un desempeño deseable para el sistema de control.

IV. TRAYECTORIA DE LA ARTICULACIÓN

La tarea más importante que tiene el control, es el seguimiento de la trayectoria en las articulaciones del robot. Esta trayectoria está definida previamente por el control cinemático, y puede cambiar dependiendo de la superficie de desplazamiento del robot y también del tipo de aplicaciones en las que se vea envuelto al robot. En la figura 5 se muestra una trayectoria de movimiento de tipo parabólico y en la figura 6 se muestra una trayectoria de tipo triangular [3][4]. Este movimiento se puede observar en la proyección del plano x z.

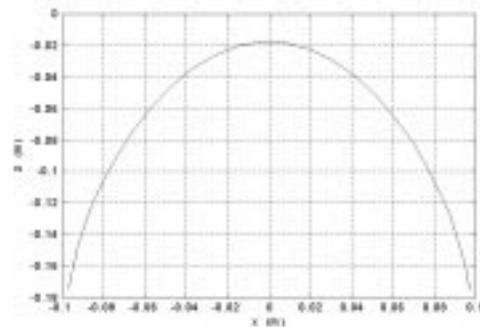


Fig. 5. Trayectoria de movimiento parabólico.

La trayectoria del movimiento que se muestra en las figura 5 esta basada en un movimiento similar al que presentan algunos animales con patas, en este caso la ecuación 8 nos describe el comportamiento de este movimiento. La trayectoria fue implementada y desarrollada para cada uno de los ángulos del sistema mecánico [5].

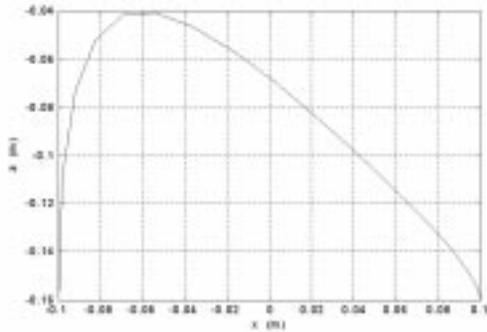


Fig. 6. Trayectoria de movimiento triangular.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= d\gamma - A\gamma(\cos \xi - 1) \\ \theta_2 &= d\beta - A\beta(\cos \xi - 1) \\ \theta_3 &= d\chi - A\chi(\cos \xi - 1)\end{aligned}\quad (8)$$

Donde $d\gamma$, $d\beta$, $d\chi$ son los valores de los ángulos θ_1 , θ_2, θ_3 , respectivamente. Estos valores construyen la posición inicial de la articulación en el espacio. La variable $A\gamma$ nos define la longitud del paso y los valores de $A\beta$, $A\chi$, nos define la altura del paso; ξ se considera un ángulo de movilidad, para nuestro robot este ángulo varía de 0 a π .

En la ecuación 9 se muestran los valores utilizados en la ecuación 8 que incluyen la trayectoria en el espacio de trabajo de la articulación, el espacio de trabajo lo podemos ver en la figura 7.

$$\begin{aligned}d\gamma &= 70 & A\gamma &= 20 \\ d\beta &= 4 & A\beta &= 15 \\ d\chi &= 310 & A\chi &= 10\end{aligned}\quad (9)$$

En la ecuación 10 se muestran las ecuaciones que determinan las trayectorias que generan el pase de la articulación triangular, donde la constante k_1 es la variable que introduce la pendiente al final del paso.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= d\gamma - A\gamma(\cos \xi - 1) \\ \theta_2 &= d\beta - A\beta(\cos \xi - 1)e^{k_1\xi} \\ \theta_3 &= d\chi - A\chi(\cos \xi - 1)e^{k_1\xi}\end{aligned}\quad (10)$$

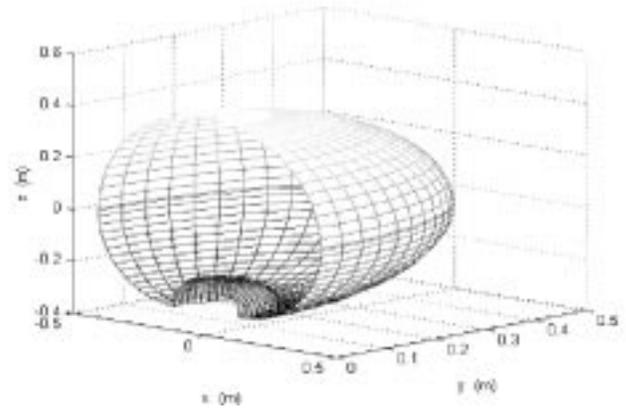


Fig. 7. Espacio de trabajo de la articulación

Para la generación de cualquier movimiento de la articulación ya dentro de algún algoritmo de locomoción debe de verificarse el espacio de trabajo de la articulación en movimiento.

V. RESULTADOS

Las ecuaciones descritas en la sección anterior nos permitieron analizar el comportamiento del movimiento en cada grado de libertad de la pata. De esta forma, se logró generar la trayectoria de paso esperada.

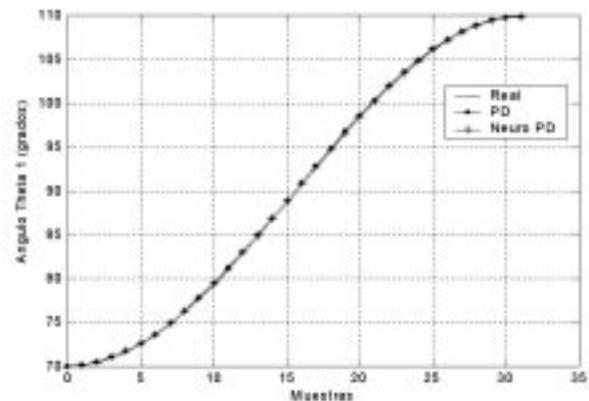


Fig. 8. Trayectoria del movimiento en el primer ángulo.

La consideración por diseño de esta trayectoria, es lograr un movimiento suave, sin cambios bruscos. La trayectoria obtenida para el primer ángulo θ_1 se muestra en la figura 8.

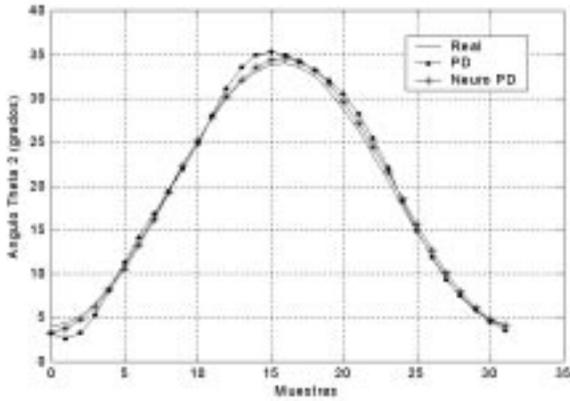


Fig. 9. Trayectoria de movimiento en el segundo ángulo.

En la figura 9 se muestra la trayectoria lograda por el segundo ángulo θ_2 . Los puntos de la grafica nos muestran el comportamiento de la variable de salida y la línea continua nos representa la trayectoria planeada por la ecuación 8. En la figura 10 se muestra una gráfica similar para el tercer ángulo θ_3 , el cual por las características de las ecuaciones describe un a trayectoria parecida a la del segundo ángulo.

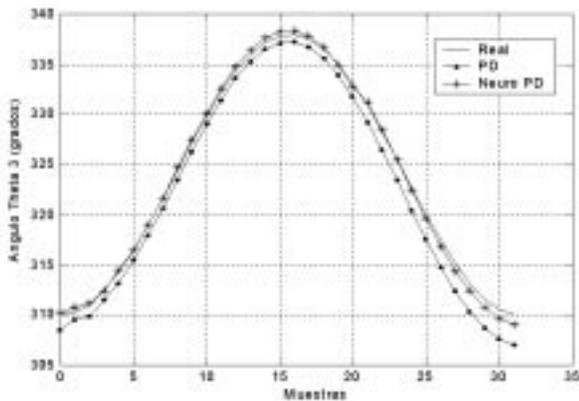


Fig. 10. Trayectoria del movimiento del tercer ángulo.

Una vez descrito el comportamiento de cada uno de los grados de libertad para realizar un paso, se verificó el movimiento simultaneo por simulación. En la figura 10 podemos observar la generación del paso proyectada en un plano. Para generación de pasos de forma automática, se simuló la altura y la longitud del paso a fin de comprobar la generación de los algoritmos orientados a la adaptación del robot en un terreno virtual conocido.

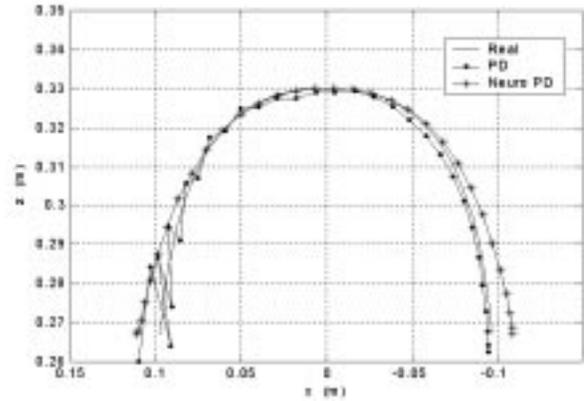


Fig. 11. Generación del paso de la articulación.

En la figura 12 se muestra el resultado de la implementación en un programa realizado en C++ para probar los distintos controles y generadores de trayectorias. El prototipo se muestra en al figura 13.



Fig. 12 Simulación de la generación del paso en la articulación

VI. CONCLUSION Y TRABAJOS FUTUROS

El modelo asociado al controlador del movimiento de la pata del robot es un sistema altamente no lineal , lo que complicó el diseño del control PD, sin embargo los resultados fueron aceptables en estas condiciones de trabajo. Un aspecto importante es la determinación de los coeficientes mostrados en las tablas 4 y 5, utilizados en la implementación del algoritmo de control correspondiente al esquema neuronal, Este esquema de control permite encontrar los valores de las constantes del control según las condiciones de operación condiciones del terreno , estos cambios se logran gracias a la adaptabilidad de la red neuronal , por otro lado también se pueden absorber las no linealidades del sistema.

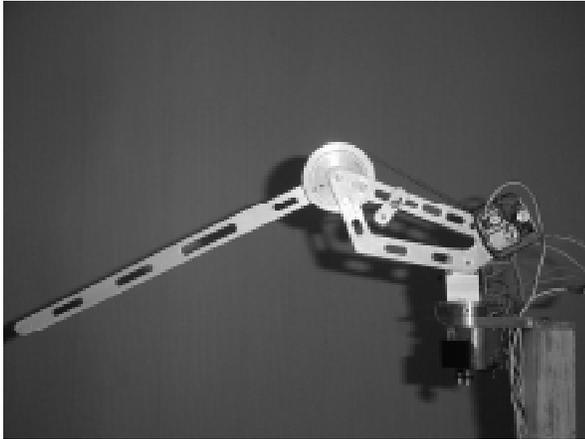


Fig. 13 Fotografía del prototipo

La implementación de los algoritmos de control hasta el momento se ha implementado en una computadora personal y posteriormente se implementará en un procesador digital de señales, DSP56F807. Este desarrollo se realizó sobre una de las seis patas del robot, debido a que el sistema en este aspecto presenta un comportamiento similar. Los resultados logrados se utilizarán para mejorar el control de las otras patas del robot, así como en coordinar sus movimientos.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Dr. Guillermo Rodríguez Vilomara por el soporte recibido para llevar a cabo la investigación y el desarrollo del robot en la Unidad de Postgrado del Centro de Ingeniería y Desarrollo industrial, CIDESI.

REFERENCIAS

- [1] Solano. J, Vargas E, Gorrostieta E, Morales. C. 2000 "Designing a Walking Robot of Six Legs " In Proceedings of International Symposium on Robotics and Automation ISRA'2000 (Monterrey N. L. , Mexico, Nov 10 – 12).
- [2] Tomás Francisco Calyeca Sánchez, Sergio Javier Torres Méndez, Germán Ardul Muñoz Hernández . 2000 "PD control system whit gravity compensation " In Proceedings of International Symposium on Robotics and Automation ISRA'2000 (Monterrey N. L. , Mexico, Nov 10 – 12).
- [3] Peter Nehaus and H Kazerooni. 2001. "Industrial-Strength Human-Assisted Walking Robots", Robotics

and Automation Magazine of IEEE, Vol. 8, No.4 , December 2001.

- [4] V. Feliu, A Garcia, J. A. Somolinos. 2001. " Gauge-Base Tip Position Control of a New Three-Degree- of – Freedom Flexible Robot", in The international Journal of Robotics Research, Vol. 20 No. 8 August 2001.
- [5] W. Ilg, T. Mühlfriedel, K. Berns, and R. Dillmann "Hybrid Learning Concepts for a Biologically Inspired Control of Periodic Movements for Walking Machines" In Soft Computing in Mechatronics. Germany 1999.
- [6] Shaoping Bai, H Low and Weimiao Guo "Kinematographic Experiments on The Leg Movements and Body Trajectories of Cockroach Walking on Different Terrain" In Proceedings of International Conferences on Robotics and Automation (San Francisco Cal, April 2001)
- [7] Aguado, A., Ordaz, A., Noriega, A. "Self-tuning neural controller". Proceedings of the IFAC Symposium on Real Time Control Architectures. Cancún, 1998.