

UBAMARI

Revista hispanoamericana de ciencia y tecnología
en alimentos y biotecnología

Año XIX Julio-Diciembre de 2002 No. 53

Sistema de levitación magnética.

Delgado Romero, J.; Castillo Gallo, J.;
González Garza, R.S.; Estrada Vargas, I.

Construcción de un robot movible controlado con lógica difusa.

Urretabizkaya, G.R.; Traslosheros, M.A.; Curtidor, H.O.

Diseño de un controlador neuronal aplicado a la generación de pasos de un robot caminante.

Gorrostieta Hurtado, E.; Aguado Behar, A.; Vargas Soto, E.

Criterios de diseño de fuentes para el corte con plasma.

López Monteagudo, F.E.; Portal Gallardo, J.L.

Procesamiento de imágenes para la detección de cáncer de piel.

Vázquez Rueda, M.; Ortiz S., M.M.

Implementación de una línea de empaque para frutas y hortalizas.

Bedoya, C.A.; Hahn, F.; Quintero Ramos, M.J.

Ajuste de parámetros de un controlador PID digital para el control de un sistema continuo.

Lerma García, P.L.; Serrano Salazar, J.A.; Gamero Inda, E.

ISSN 0185-4518

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DISEÑO DE UN CONTROLADOR NEURONAL APLICADO A LA GENERACIÓN DE PASOS DE UN ROBOT CAMINANTE

¹Gorrostieta-Hurtado, E.; ²Aguado-Behar, A.; ³Vargas-Soto, E.

¹ Instituto Tecnológico de Querétaro Av. Tecnológico esq. Escobedo C.P 76150 Santiago de
Querétaro, Qro. México. efren.hurtado@usa.net

²Departamento de Control Automático, Instituto de Cibernética, Matemática y Física, Calle 15, N°
551 e/ C y D, Cuba aguado9941@yahoo.es

³Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Unidad de Investigación y Postgrado. Pie de la
Cuesta No. 702, Col. San Pablo, C.P. 76130 Querétaro, Qro. emilio@mecatronica.net

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el desarrollo de un control PD neuronal utilizado para la generación de las trayectorias de los pasos en un robot caminante de seis patas. El trabajo está dividido en tres partes. En la primera se muestra el modelo dinámico del sistema mecánico asociado a la pata del robot, en la segunda parte se muestran las alternativas del control diseñadas, los dos controles PD y PD neuronal con compensación de gravedad. Finalmente, el trabajo termina analizando algunos de los resultados obtenidos en simulación y experimentación, comprobándose la hipótesis de que un sistema de control neuronal presenta mejor desempeño que un sistema de control no lineal.

Palabras clave: Robot caminante, control neuro-PD

DESIGN OF A NEURO-CONTROLLER FOR A STEPS GENERATOR OF A WALKING ROBOT

ABSTRACT

This paper reports the work done on the design and development of a Neuro-PD controller to generate steps trajectories for a six legged walking robot. The paper describe in the first part the dynamic model of the leg, a second part in the paper shows the alternatives considered to control the leg position, a PD and Neuro-PD with gravity compensation was implanted. Finally, some results from computer simulation and experimentation are discussed, verifying the hypothesis as a neuro controller shows a better efficiency than a non-linear controller.

Keywords: Walking robot, neuro PD.

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 caiga durante su desplazamiento. Mucho 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, es importante conocer la distribución de las fuerzas durante el caminar y la adaptabilidad del robot cuando se desplaza sobre diferentes tipos de terreno. Desarrollar un control que nos permita disminuir este tipo de dificultades es el objetivo principal de este trabajo.

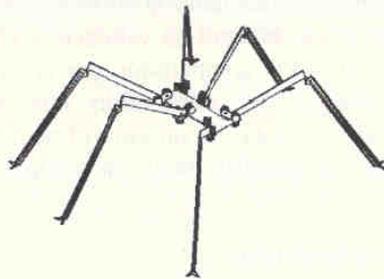


Fig. 1. Configuración del robot caminante.

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 de éste. En la Figura 1 se muestra el diseño del robot el cual utiliza una morfología parecida a la de las hormigas [1]. El seguimiento de la trayectoria a realizar debe efectuarse a pesar de las no linealidades del sistema.

Se considera que el sistema a controlar es una de las articulaciones del robot caminante. Los puntos más críticos de control son en primera instancia la no linealidad que presenta el sistema y como segundo punto las perturbaciones debidas al medio ambiente por donde caminará el robot, como son, por ejemplo, las irregularidades en el terreno. La hipótesis es que un control convencional

PD con compensación de gravedad no presentan un buen desempeño en este tipo de sistema, por lo que se requiere una componente adaptativa para compensar los puntos críticos de control. En este caso se propone una red neuronal, la cual tenga la capacidad de entrenarse en tiempo real, de forma que esta red sea capaz de actuar sobre la ley de control, buscando que el movimiento en la articulación de la pata sea lo más cercana posible a la planeada por el generador de trayectoria del robot, y así garantizar un control confiable de los movimientos en cada articulación.

METODOLOGÍA

Se procedió a modelar la pata del robot, se realizó un programa en computador que permitiera simular el modelo cinemático y dinámico de la pata. Así mismo, se analizó el modelo dinámico y se efectuó su validación. Una vez terminada esta parte, se implementó un control PD compensado por gravedad, se sometió a dos generadores de trayectoria y se observaron los resultados obtenidos; posteriormente se realizó el desarrollo de un control neuro PD y se compararon los resultados obtenidos de las pruebas, tanto en control de posición como en velocidad.

Modelo dinámico 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, ésta 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. Se considera 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.

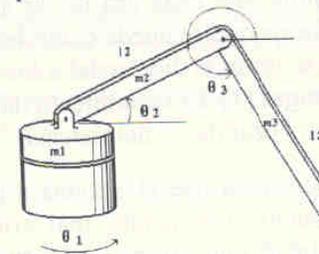


Fig. 2. Parámetros del modelo de la pata.

La dinámica de la pata se analizó utilizando el modelo energético de 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) se 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 está expresado en la ecuación, como un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden no lineal.

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

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

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

$$\begin{aligned} a_{33} &= \frac{1}{4} l_3 m_3 + J_3 \\ b_{21} &= -\frac{1}{2} l_2^2 (m_2 \sin 2\theta_2 + m_3 \sin 2\theta_2) - \frac{1}{4} m_3 l_2 l_3 \cos \theta_3 \sin \theta_2 \\ b_{23} &= \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_3) \\ b_{31} &= \frac{1}{2} m_3 l_3 (l_2 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_3) \\ b_{32} &= \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3) \end{aligned} \quad (5)$$

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

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

Los coeficientes f_{ij} 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 que se utilizaron en la evaluación de las ecuaciones dinámicas mediante simulación, se muestran en la tabla 1.

CONTROL DINÁMICO DE LA ARTICULACIÓN

Una vez construido el modelo dinámico, se procedió a implementar dicho modelo para contar con una herramienta que permitiera analizar el comportamiento del sistema. Con relación al desarrollo del control, conviene recordar que en el caso de los controles aplicados a la robótica 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 ésta. El resultado es la consecución de los valores cinemáticos en la pata. El siguiente nivel corresponde al control dinámico. 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].

Tabla 1. Valores de los parámetros del modelo dinámico

M_1	0.0126 Kg.	J_1	$1.95 \times 10^{-3} \text{ Kgm}^2$
M_2	0.0226 Kg.	J_2	$2.95 \times 10^{-3} \text{ Kgm}^2$
M_3	0.0153 Kg.	J_3	$1.95 \times 10^{-3} \text{ Kgm}^2$
l_1	0 m	\square_1	0.03
l_2	0.13 m	\square_2	0.04
l_3	0.31 m	\square_3	0.02

Este control de PD por compensación por gravedad fue propuesto por Tankegaki y Arimoto y considera la ley de control descrita por la ecuación (8).

$$\tau = K_p \theta + K_v \dot{\theta} + G(\theta) \tag{8}$$

El control PD requiere el ajuste de las ganancias proporcionales K y las ganancias derivativas K_d para cada grado de libertad. De esta forma, el control de posición que se diseñó utiliza 6 constantes para sintonizar el control de posición y otras 6 constantes para ajustar el control de la velocidad.

Tabla 2. Constantes de control PD para posición

K_1	K_2	K_3	K_{d1}	K_{d2}	K_{d3}
0.06	0.09	0.2	0.009	0.6	0.01

Tabla 3. Constantes de control PD para velocidad

K_1	K_2	K_3	K_{d1}	K_{d2}	K_{d3}
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 2. Estos valores permitieron un seguimiento de los puntos requeridos por el generador de trayectoria previamente definido para la construcción del paso. En la tabla 2 se muestran los valores de las constantes

del control PD para cumplir con el perfil de velocidad, también previamente determinado. Debido a la no linealidad del sistema, el control PD presenta algunas desviaciones en el seguimiento, tanto de la trayectoria de posición como en la de velocidad.

Algoritmo neuro PD

En la figura 4 se muestra el diagrama de bloques de control neuro PD; por claridad se describen solamente dos. La red neuronal utilizada es de tipo perceptrón, con una capa intermedia que cuenta con una función de activación sigmoide. La capa de salida es una función lineal y es una sola neurona. Las salidas de las redes son ΔK_p y ΔK_v que representan los incrementos de la ganancia proporcional y el incremento de la ganancia derivativa respectivamente.

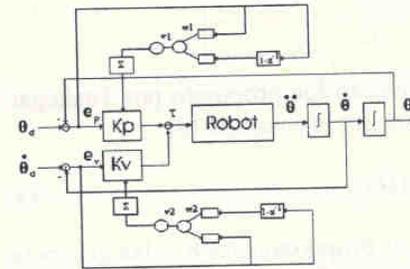


Fig. 4 Diagrama del control neuro PD

La entrada de cada una de las redes es el error y la primera diferencia del error, esto es:

$$x(t) = [e_p(t) \quad \Delta e_p(t)] \tag{10}$$

donde
$$e_p(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \tag{11}$$

Representa el error de cada uno de los ángulos. Las redes son entrenadas por el método conocido como algoritmo de retro-propagación, el cual se desarrolla a detalle para el caso de la constante proporcional. La constante proporcional se puede deducir de manera similar. El criterio de minimización está dado por la función cuadrática del error de la ecuación (12).

$$E(t) = \frac{1}{2} \sum e_p^2(t) \tag{12}$$

Los ángulos $\theta(t)$ de cada uno de los eslabones de las articulaciones del robot son proporcionales al torque

$$\theta(t) = R(\tau(t)) \quad (13)$$

El torque calculado por la ley de control está expresado en la ecuación (14). El efecto de la gravedad se omitió por razones de simplicidad para comprender el proceso adaptivo, como una primera aproximación.

$$\tau(t) = k_p e_p(t) + k_v e_v(t) \quad (14)$$

La ganancia proporcional está denotada por la siguiente ecuación:

$$k_p = k_p + \Delta k_p \quad (15)$$

$$\Delta k_p = v h \quad (16)$$

$$s = w_1 e_p(t) + w_2 \Delta e_p(t) \quad (17)$$

La activación de la neurona que se encuentra en la zona intermedia está dada por la siguiente ecuación:

$$h = \frac{1}{1 + e^{-s}} \quad (18)$$

Para aplicar el algoritmo de retro propagación es necesario calcular el gradiente de la función E_p con respecto a los coeficientes v y w

$$\nabla E(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial E(t)}{\partial v_1} \\ \frac{\partial E(t)}{\partial w_j} \end{bmatrix}$$

Las derivadas parciales que aparecen en la ecuación (18) son calculadas según la regla de la cadena para las derivadas

$$\frac{\partial E(t)}{\partial v_1} = \frac{\partial E(t)}{\partial e_p} \frac{\partial e_p}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial K_p} \frac{\partial K_p}{\partial \Delta K_p} \frac{\partial \Delta K_p}{\partial v_1} \quad (20)$$

$$\frac{\partial E(t)}{\partial w_j} = \frac{\partial E(t)}{\partial e_p} \frac{\partial e_p}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial K_p} \frac{\partial K_p}{\partial \Delta K_p} \frac{\partial \Delta K_p}{\partial h} \frac{\partial \Delta K_p}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial w_j} \quad (21)$$

Después de calcular las derivadas parciales que aparecen en las ecuaciones (20) y (21) obtienen las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial E_p}{\partial v_1} = -e_p(t)^2 h \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (22)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial v_1} = -e_p(t)^2 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} v_1 h(1-h)x_j \quad (23)$$

En (21) y (23) aparece la derivada parcial $\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$, este término es una dificultad de la evaluación del modelo, ya que se desconoce. Sin embargo, como fue demostrado en [3] y [4], bajo algunas condiciones no muy restrictivas, las ecuaciones (22) y (23) se pueden simplificar:

$$\frac{\partial E_p}{\partial v_1} = -e_p(t)^2 h \text{sign}(R) \quad (24)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial v_1} = -e_p(t)^2 \text{sign}(R) v_1 h(1-h)x_j \quad (25)$$

La función $\text{sign}(R)$ se evalúa con los valores de +1 o -1, dependiendo del signo de la relación entre la posición angular y el esfuerzo de torsión aplicado que se pueda considerar; para el caso de la articulación del robot, siempre será positivo. Las ecuaciones (24) y (25) se pueden utilizar para derivar las ecuaciones que

logran la adaptación para los coeficientes del peso de la red, del w y v de las neuronas, usando el método de máximo descenso, como sigue:

$$v_1(t+1) = v_1(t) + \eta e_p(t)^2 h \text{sign}(R) \quad (26)$$

$$w_j(t+1) = w_j(t) + \eta e_p(t)^2 \text{sign}(R) v_1 h(1-h)x_j \quad (27)$$

Las ecuaciones adaptantes (26) y (27) se pueden calcular con relativa facilidad en tiempo real y se utilizan para adaptar los valores de los coeficientes proporcionales K_p , usando las ecuaciones (15) y (16). Una derivada similar se puede utilizar para encontrar las ecuaciones de la adaptación de los coeficientes derivados K_d . El esquema adaptivo de las neuronas se utiliza de una manera permanente, lo que permite alcanzar un buen desempeño del control, así como el cálculo constante de las ganancias del control, dependiendo de las perturbaciones que se presenten y las no linealidades del sistema. En las tablas IV y V, se muestran los valores proporcionales y derivados obtenidos después de varias simulaciones del algoritmo neuronal del control PD, dividiéndose de los valores como muestran las tablas 2 y 3

Tabla 4. Constantes de control Neuro PD para el control de posición

K1	K2	K3	Kd1	Kd2	Kd3
0.07	0.30	0.18	0.01	0.01	0.00
1	1	1		1	7

Tabla 5. Constantes de control Neuro PD para el control de velocidad

K1	K2	K3	Kd1	Kd2	Kd3
0.05	1.70	0.18	0.01	0.02	0.02
3	2	3	4	2	3

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.

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 se define a través de un generador de trayectoria que utiliza el modelo de control cinemático. La trayectoria de los pasos no siempre es la misma, puede cambiar dependiendo de la superficie de desplazamiento del robot y también del tipo de aplicación en las que se vea envuelto el robot. En la figura 5 se muestra una trayectoria de movimiento de tipo parabólico simulada en computadora.

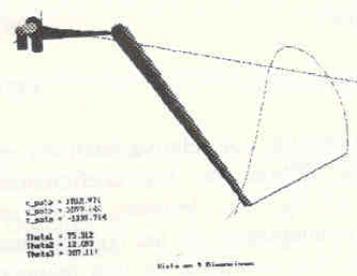


Fig. 5. Trayectoria 3D tipo parabólica.

Puede apreciarse la trayectoria tipo parabólica que se genera de forma automática para realizar un paso. En la figura 6 se muestra una trayectoria de tipo triangular [5] y [6]. Este movimiento se puede observar en la proyección del plano $x-z$.

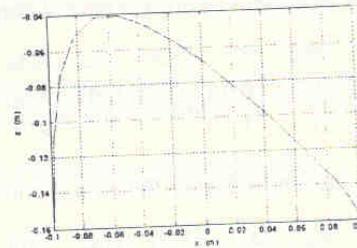


Fig. 6. Trayectoria de movimiento triangular.

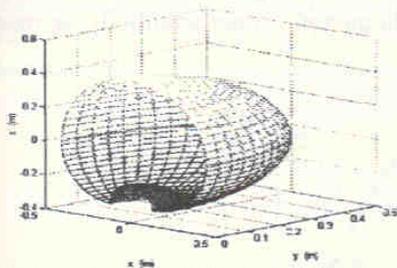
La trayectoria del movimiento que se muestra en la figura 5 está basada en un movimiento similar al que presentan algunos animales con patas, en este caso la ecuación (28) describe el comportamiento de este movimiento [7] y [8]. La trayectoria fue implementada y desarrollada para cada uno de los ángulos del sistema mecánico.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= d\gamma - A\gamma(\cos\xi - 1) \\ \theta_2 &= d\beta - A\beta(\cos\xi - 1) \\ \theta_3 &= d\chi - A\chi(\cos\xi - 1) \end{aligned} \quad (28)$$

donde $d\gamma$, $d\beta$, $d\chi$ son los valores de los ángulos θ_1 , θ_2 , y θ_3 , respectivamente. Dichos valores son necesarios para generar la posición inicial de la articulación en el espacio. La variable $A\gamma$ define la longitud del paso y los valores de $A\beta$, $A\chi$, definen la altura del paso; ξ se considera un ángulo de movilidad, para el robot, este ángulo varía de 0 a π . En la ecuación (29) se muestran los valores utilizados en la ecuación (28) que incluyen la trayectoria en el espacio de trabajo de la articulación. El espacio de trabajo se puede ver en la Figura 7.

$$\begin{aligned} d\gamma &= 70 & A\gamma &= 20 \\ d\beta &= 4 & A\beta &= 15 \\ d\chi &= 310 & A\chi &= 10 \end{aligned} \quad (29)$$

En (30) se muestran las ecuaciones que determinan las trayectorias que generan el paso de la articulación triangular, donde la constante k_1 es la variable que introduce la pendiente al final del paso.



$$\begin{aligned} \theta_1 &= d\gamma - A\gamma(\cos\xi - 1) \\ \theta_2 &= d\beta - A\beta(\cos\xi - 1)e^{k_1\xi} \\ \theta_3 &= d\chi - A\chi(\cos\xi - 1)e^{k_1\xi} \end{aligned} \quad (30)$$

Fig. 7 Espacio de trabajo de la articulación

Para la generación de cualquier movimiento de la pata, es importante verificar el espacio de trabajo. En este sentido, se estudió y simplificó la forma que presenta el espacio de trabajo de la pata, considerando las limitaciones de espacio y la

posible interferencia de la pata con el cuerpo del robot. La figura 7 muestra la forma que se obtuvo del espacio de trabajo, para el diseño de robot descrito.

RESULTADOS

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

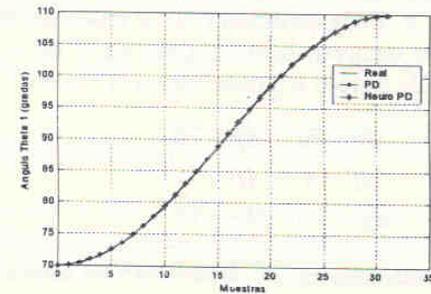


Fig. 8. Trayectoria del movimiento en el primer ángulo.

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.

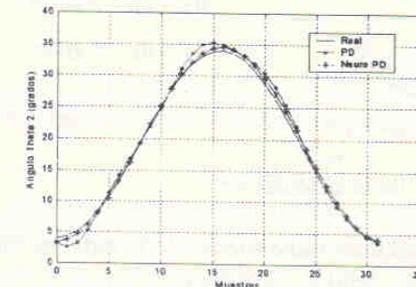


Fig. 9. Trayectoria de movimiento en el segundo ángulo.

En la figura 9 se muestra la trayectoria lograda por el segundo ángulo θ_2 . Los puntos de la gráfica muestran el comportamiento de la variable de salida y la línea continua representa la trayectoria planeada por la ecuación (30). En la figura 10 se muestra una gráfica similar para el tercer ángulo θ_3 , el cual por las características de las ecuaciones, describe una trayectoria parecida a la del segundo ángulo.

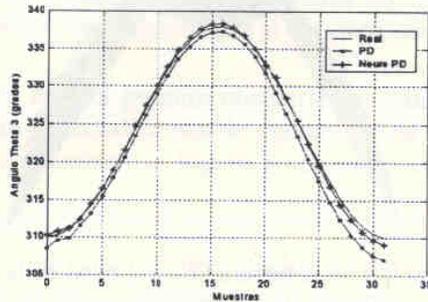


Fig. 10. Trayectoria del movimiento del tercer ángulo.

Una vez descrito el comportamiento de cada uno de los grados de libertad para realizar un paso, se verificó el movimiento simultáneo por simulación. En la figura 10 se puede observar la generación del paso proyectado 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.

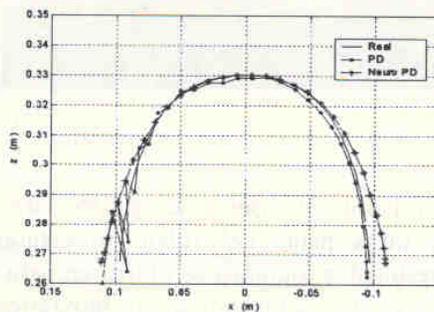


Fig. 11. Generación del paso de la articulación.

En la figura 12 se muestra el resultado de la implementación de la trayectoria de la pata, con un programa implementado en lenguaje C++. De esta forma, el programa se utilizó para probar los distintos controles y generadores de trayectorias. El prototipo de pata construido [9] se muestra en la figura 13.

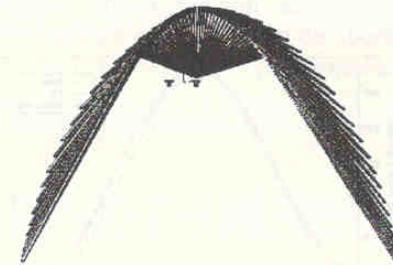


Fig. 12 Simulación de la generación del paso en la articulación

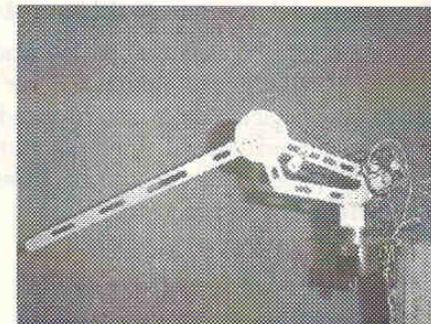


Fig. 13 Fotografía del prototipo

El desarrollo del controlador de diseño se realizó para una pata solamente, considerando que las otras patas del robot presentarán similitudes en su comportamiento. Los resultados logrados se utilizarán para mejorar el control de todas las patas, así como en la coordinación de sus movimientos.

CONCLUSIONES

- 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 PI sin embargo, los resultados fueron aceptables en estas condiciones de trabajo. Un aspecto importante fue la determinación de los coeficientes mostrados en las tablas IV y V, 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, así como las condiciones del terreno. Estos cambios se logran gracias a la adaptabilidad de la red neuronal.
- Se observó que utilizando el controlador neuro-PD también se puede absorber algunas de las no linealidades del sistema.
- La implementación de los algoritmos de control hasta el momento, se ha implementado en una computadora personal. Sin embargo, se pretende que éstos sean transferidos a un procesador digital de señales, DSP56F807.

RECONOCIMIENTOS

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

BIBLIOGRAFÍA

- 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 with gravity compensation" In Proceedings of International Symposium on Robotics and Automation ISRA'2000 (Monterrey N. L., Mexico, Nov 10 – 12).
- 3 Aguado, A., Ordaz, A., Noriega, A. "Self-tuning neural controller" Proceedings of the IFAC Symposium on Real Time Control Architecture Cancún, 1998.
- 4 Cui, X., Chin, K.G. "Direct Control and Coordination using Neural Networks" IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics", Vol. 22 No. 3, pp 686-697, 1992.
- 5 Peter Nehaus and H Kazerooni. 2001. "Industrial-Strength Human-Assisted Walking Robots", Robotics and Automation Magazine of IEEE, Vol. 28 No. 4, December 2001.
- 6 V. Feliu, A Garcia, J. A. Somolinos. 2001. "Gauge-Base Tip Position Control of a New Three-Degree-of-Freedom Flexible Robot", in International Journal of Robotics Research, Vol. 20 No. 8 August 2001.
- 7 W. Ilg, T. Mühlfriedel, K. Berns, and R. Dillmann "Hybrid Learning Concepts for a Biologically Inspired Control of Periodic Movements: Walking Machines" In Soft Computing in Mechatronics. Germany 1999.
- 8 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)
- 9 Vargas E., Gorrostieta E., Pérez A., "Desarrollando una Pata para un Robot Hexápodo", Memorias de la VII Reunión Internacional de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, Noviembre 2002