

Desarrollando una Pata para un Robot Hexápodo

Emilio Vargas¹, Efrén Gorrostieta², Alejandro Pérez²

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
Av. Pie de la Cuesta No. 702, Col. Desarrollo San Pablo, C.P. 76130 Querétaro, Qro.
emilio@mecatronica.net

² Instituto Tecnológico de Querétaro
Av. Tecnológico esq. Escobedo, C.P. 76000 Querétaro, Qro
efren.gorrostieta@usa.net

Resumen

*En este artículo mostramos en forma resumida parte de un trabajo de investigación relacionado con el diseño de un robot caminante de seis patas llamado: ROSEP-1 (**RO**bot de **SE**is **P**atas). Se muestra el modelo cinemático asociado a la posición del cuerpo del robot y a sus patas. Así mismo, se muestra la modelación dinámica asociada al control de la pata, y diversas trayectorias diseñadas para lograr la generación automática de un paso. Finalmente, se muestran los resultados logrados hasta el momento y el trabajo a realizar.*

Abstract

In this paper is described a research work related with the design of a six legged walking robot named: ROSEP-1 (Robot de Seis Patas). It is described the way as the robot configuration was determined, and also the kinematics model to determine the position of the robot's legs. The paper shows the dynamic model used to control the leg, and the planning trajectory to make automatically a step with a leg. Finally, some future work is mentioned as a part of this research.

Palabras clave: Diseño mecánico de robots, robots con patas, Robot caminante.

1. Introducción

Recientemente las investigaciones en robótica se enfocan hacia el desarrollo de máquinas caminantes, debido a que en algunas aplicaciones se requiere de una considerable movilidad, sobre todo cuando se tiene la necesidad de locomoción en terrenos irregulares. Los robots con patas permiten una coordinación de movimientos para aislar las irregularidades del terreno. Así mismo, se busca desarrollar máquinas que requieran poca intervención humana o la disminución de algunas restricciones no deseadas en las mismas [1].

Es por eso que en algunos casos el proceso para el diseño de un robot (p. e.

longitud de los eslabones, posición de los centros de gravedad de los elementos del robot, dimensiones del cuerpo y otros parámetros estructurales) ha sido delegado hacia la imitación de estructuras del ambiente natural, especialmente para máquinas caminantes donde las estructuras presentan poca simplicidad pero un amplio margen de adaptabilidad.

Por esta razón, algunos diseñadores de robots caminantes tratan de imitar las criaturas de la naturaleza que tienen múltiples patas, con lo que se trata de hacer una mejor aproximación a ellas,. Como un ejemplo esta la hormiga, que es un insecto con seis patas (hexapodos) o cualquier otro animal viviente. Las investigaciones de este

campo buscan copiar la manera del como lo natural ha generado seres con mejores perspectivas, interesantes y prometedores para su imitación en algún o algunos puntos específicos de su proceso natural de evolución.

Si podemos imitar el motor para generar un ser caminante, entonces podemos encontrar soluciones prácticas para escenarios, donde la geometría de las patas es un aspecto crucial del diseño e influye fuertemente en la eficiencia del robot [2] y con lo cual, se realiza un estudio de los puntos físicos importantes para el conocimiento de una locomoción real.

Algunas de las aplicaciones más interesantes de robots autónomos móviles son las que requieren una complejidad alta de la cinemática del robot. Ejemplos de estas aplicaciones son la exploración de planetas remotos, la inspección sobre terreno accidentado, o en áreas destruidas o contaminadas, etc. De cualquier modo, la complejidad en el diseño del robot requiere métodos de control específicos en su sistema de locomoción y estabilidad.

En este trabajo se presenta parte del diseño de un robot caminante de seis patas, así como la experiencia lograda en el diseño y la implantación del control para una pata. El estudio de los movimientos del robot nos permite lograr el balance requerido para sostener el cuerpo del robot durante su desplazamiento.

Cada pata consta de tres grados de libertad, los cuales son accionados por motores de 12 VDC, lo que nos llevó a diseñar un sistema de control redundante para los 18 motores que se utilizarán en el robot. El sistema de control se ha diseñado considerando 3 niveles de mando: 1) Generador de Movimientos, 2) Generador

de trayectorias y 3) Controlador de posición. Todos los niveles serán comunicados vía paralela.

2. Modelo Cinemático

El modelo cinemático del ROSEP-I se basa en las ecuaciones que determinan la posición y la orientación del cuerpo, tomando en cuenta la posición final que adoptan las patas sobre un terreno irregular, así como la inherente redundancia del complejo sistema mecánico articulado formado por los dieciocho grados de libertad que permiten dirigir la orientación del robot. La siguiente figura muestra las relaciones vectoriales de las posiciones de las patas con respecto al cuerpo del robot y a un sistema de referencia inercial colocado fuera del cuerpo del robot.

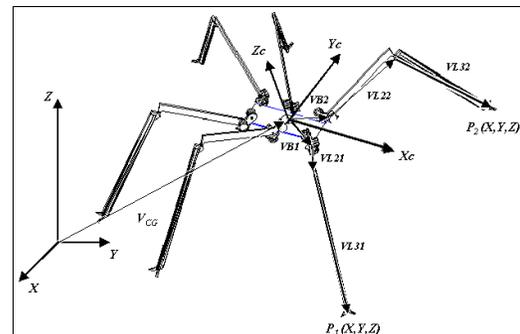


Fig.1 Relaciones vectoriales del robot

La ecuación simplificada que determina la posición de la i-ésima pata puede ser expresada como:

$$\vec{V}_{P_i} = \vec{V}_{CG} + \vec{V}_{B_i} + \vec{V}_{L_{2i}} + \vec{V}_{L_{3i}} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{P_i} \quad (1)$$

Donde V_{P_i} representa al vector de posición de la i-ésima pata, V_{CG} es el vector de posición del centro de gravedad del cuerpo

del robot con respecto al sistema de referencia inercial, V_{Bi} es el vector de posición de la base de la i -ésima pata medido a partir del centro de gravedad del cuerpo del robot, V_{L2i} es el vector de posición para la segunda articulación en la i -ésima pata, y V_{L3i} es el vector de posición para el tercer grado de libertad de la i -ésima pata del robot.

3. Mecanismo de las Patas

Como se ha mencionado anteriormente las patas del robot presentan tres grados de libertad de tipo rotacional, logrando con esto un diseño que hace prever que el robot se pueda adaptar a las irregularidades que presenten diferentes tipos de terreno. El modelo cinemático del robot para cada pata se basa en la parametrización que se muestra en la figura 2:

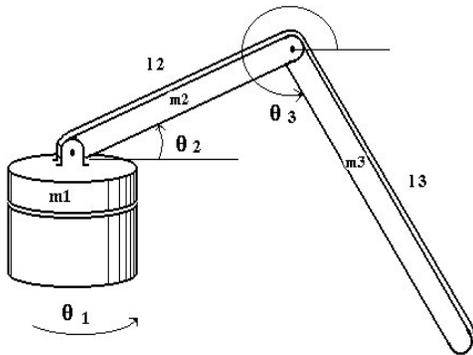


Fig. 2. Parámetros utilizados en el modelo de la pata.

La i -ésima posición de la pata del robot esta dada por la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} (L2i \cos \theta 2i + L3i \cos \theta 3i) \cos \theta 1i \\ (L2i \cos \theta 2i + L3i \cos \theta 3i) \sin \theta 1i \\ L2i \sin \theta 2i + L3i \sin \theta 3i \end{bmatrix} = \vec{V}L2i + \vec{V}L3i \quad (2)$$

La orientación del cuerpo del robot se controla a partir de las ecuaciones redundantes de la posición que adoptan las patas durante la locomoción del robot [4]. De esta forma, el control de la orientación del cuerpo se efectúa mediante el movimiento coordinado de las patas que conforman las cadenas cinemáticas cerradas, para cada una de las patas que se encuentran apoyadas sobre el terreno

4. Modelo Dinámico de una Pata

Para diseñar el control es necesario conocer el modelo dinámico de la pata del robot. 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.

La dinámica de la pata se analizó utilizando el modelo energético de Lagrange. La ecuación 3 muestra la relación fundamental entre la energía interna y la energía externa, donde K representa la energía cinética del sistemas mecánico y U representa la energía potencial.

$$L = K - U \quad (3)$$

En la ecuación 4 muestra la relación fundamental entre el torque y la fuerza generalizada correspondiente.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_n} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_n} = \tau \quad (4)$$

El modelo matemático para la articulación esta expresado en la ecuación 5, como un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden no lineal .

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & 0 & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} + \dots$$

$$+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{21} & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \theta_2 \\ \theta_1 \theta_3 \\ \theta_2 \theta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{22} & f_{23} \\ 0 & 0 & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 g \\ m_2 g \\ m_3 g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

La ecuación 6 muestra los coeficientes de la matriz de inercia utilizados en la ecuación 5.

$$a_{11} = J_1 + m_3 l_2^2 \cos^2 \theta_2 + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + \frac{1}{4} m_3 l_3^2 \cos^2 \theta_3$$

$$a_{22} = J_2 + \frac{1}{4} l_2 m_2 + l_3 m_3$$

$$a_{23} = \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3)$$

$$a_{32} = \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3)$$

$$a_{33} = \frac{1}{4} l_3 m_3 + J_3 \quad (6)$$

Además,

$$b_{21} = -\frac{1}{2} l_2^2 (m_2 \sin 2\theta_2 + m_3 \sin 2\theta_2) - \frac{1}{4} m_3 l_2 l_3 \cos \theta_3 \sin \theta_2$$

$$b_{23} = \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_3)$$

$$b_{31} = \frac{1}{2} m_3 l_3 (l_2 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_3)$$

$$b_{32} = \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_2 \cos \theta_3) \quad (7)$$

Los términos de la aceleración de Coriolis están definidos por los cuadrados de las velocidades de los ángulos y los términos definidos en 8.

$$c_{11} = -(m_3 l_2^2 \sin 2\theta_2 + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \frac{1}{4} m_3 l_3^2 \sin 2\theta_2)$$

$$c_{12} = -(\frac{1}{2} m_3 l_3 l_2 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \frac{1}{2} m_3 l_3^2 \sin 2\theta_3)$$

$$c_{21} = \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\cos \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_3 \cos \theta_2)$$

$$c_{23} = \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\cos \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_3 \cos \theta_2)$$

$$c_{33} = \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 (\sin \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_3) \quad (8)$$

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

$$f_{22} = \frac{1}{2} l_2 \cos \theta_2$$

$$f_{23} = l_2 \cos \theta_2$$

$$f_{33} = \frac{1}{2} l_3 \cos \theta_3 \quad (9)$$

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	$1.95 \times 10^{-3} \text{Kgm}^2$
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	θ_1	0.03
l_2	0.13 m	θ_2	0.04
l_3	0.31 m	θ_3	0.02

5. Control Dinámico de la Pata

Una vez construido el modelo dinámico, se procedió a implementar dicho modelo en programas de computadora, a fin de 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].

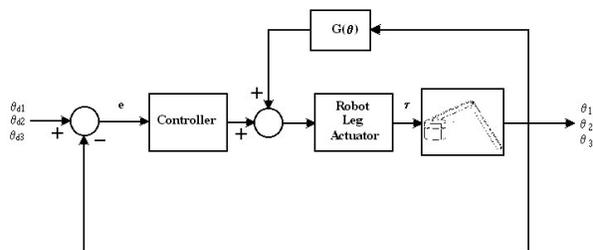


Fig.3. Diagrama de bloques del sistema de control .

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.

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, el cual se encuentra en etapa de diseño. Este control va determinando las constantes de la ley de control mediante el aprendizaje de la red neuronal.

6. Planificación de Trayectorias

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.

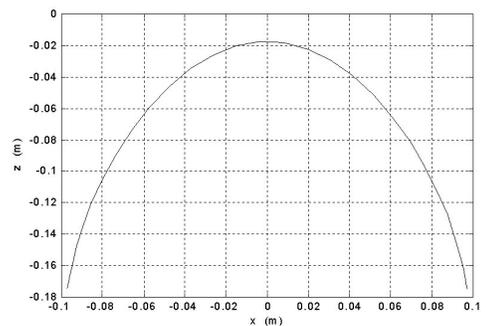


Fig. 4. Trayectoria del movimiento parabólico.

En la figura 5 se muestra un 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.

La trayectoria del movimiento que se muestra en las figura 4 esta basada en un movimiento similar al que presentan algunos animales con patas, en este caso la ecuación 10 nos describe el comportamiento de este movimiento. La trayectoria fue implementada y desarrollada para cada uno de los ángulos del sistema mecánico [5].

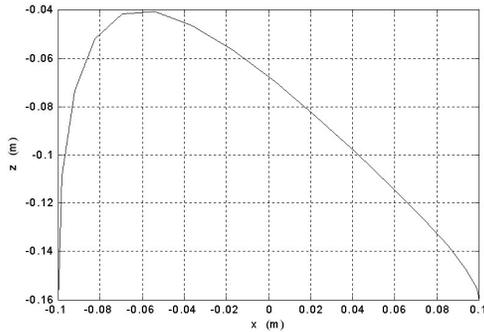


Fig. 5. Trayectoria de movimiento triangular.

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

Donde $d\gamma$, $d\beta$, $d\chi$ son los valores de los ángulo θ_1 , θ_2 y 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 diseño de robot este ángulo adopta valores entre 0 y π radianes.

En la ecuación 11 se muestran los valores utilizados en la ecuación 10 que incluyen la

trayectoria en el espacio de trabajo de la articulación, el espacio de trabajo lo podemos ver en la figura 6.

$$\begin{aligned} d\gamma &= 70 & A\gamma &= 20 \\ d\beta &= 4 & A\beta &= 15 \\ d\chi &= 310 & A\chi &= 10 \end{aligned} \quad (11)$$

En la ecuación 12 se muestran las ecuaciones que determinan las trayectorias que generan el pase de la articulación triangular, donde la constante $k1$ es la variable que introduce la pendiente al final del paso.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= d\gamma - A\gamma(\cos \xi - 1) \\ \theta_2 &= d\beta - A\beta(\cos \xi - 1)e^{k1\xi} \\ \theta_3 &= d\chi - A\chi(\cos \xi - 1)e^{k1\xi} \end{aligned} \quad (12)$$

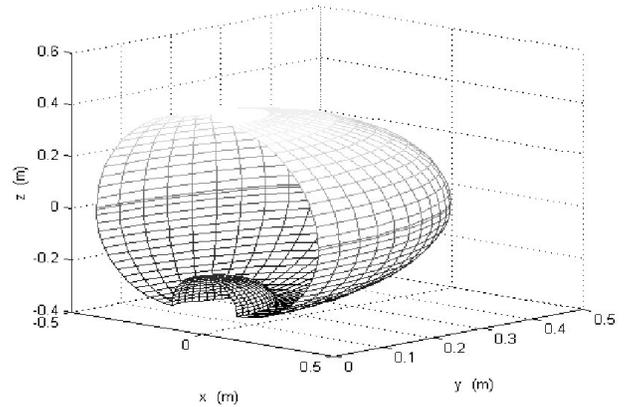


Fig. 6 Espacio de trabajo de la articulación

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.

7. Resultados

Las ecuaciones descritas en al 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.

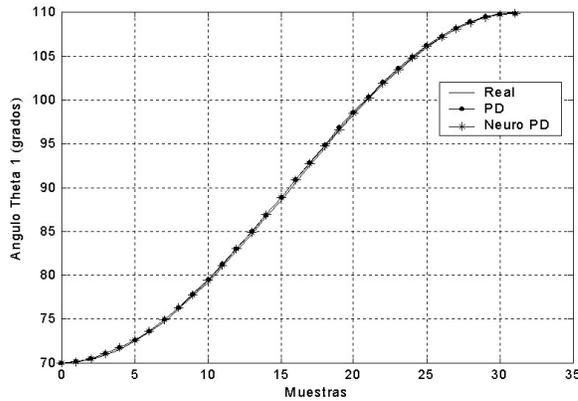


Fig. 7. Trayectoria del movimiento en el primer ángulo.

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 7.

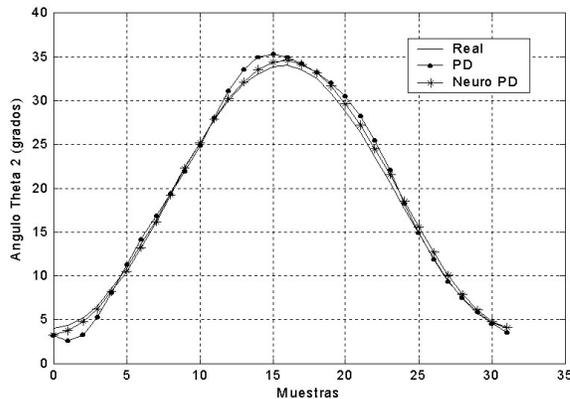


Fig. 8. Trayectoria de movimiento en el segundo ángulo.

En la figura 8 se muestra la trayectoria lograda por el segundo ángulo θ_2 . Los puntos de la gráfica nos muestran el comportamiento de la variable de salida y la línea continua nos representa la trayectoria planeada por la ecuación 10. En la figura 9 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.

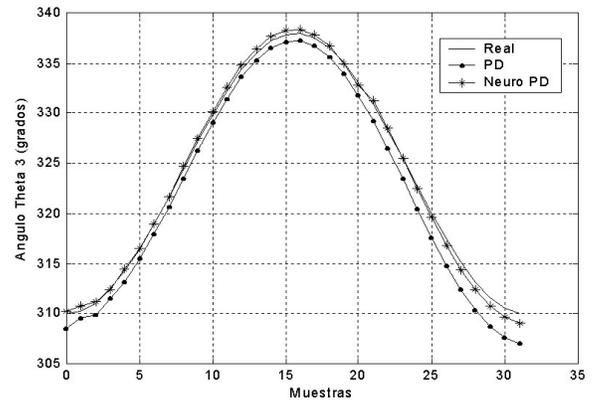


Fig. 9. Trayectoria del movimiento del tercer ángulo.

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.

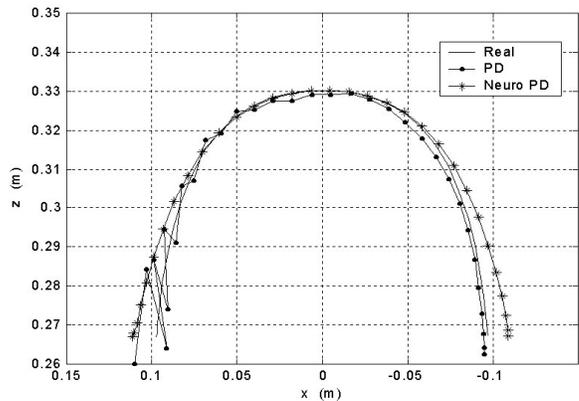


Fig. 10. Generación del paso de la articulación.

En la figura 11 se muestra el resultado de la implementación en un programa realizado en C++ para probar los distintos controles y generadores de trayectorias.

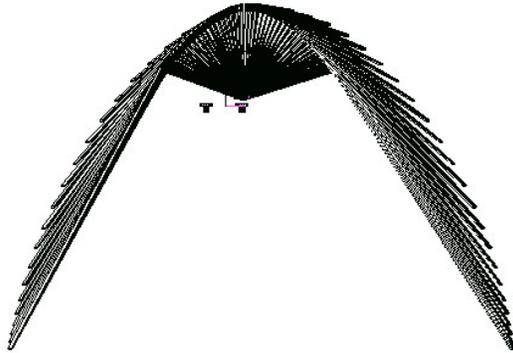


Fig. 11 Simulación de la generación del paso en la articulación. Vista lateral

8. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se han presentado el diseño de una pata del robot ROSEP-I. También se mostró una descripción breve de la cinemática del cuerpo, y la pata del robot, así como la modelación de la dinámica asociada al control los elementos que integran una pata del robot. Diversas trayectorias se han presentado, así como su parametrización, de esta forma se prevé el uso de funciones similares para hacer que el robot se adapte al terreno durante su desplazamiento.

En este momento nos encontramos desarrollando un simulador en 3D que nos permitirá de forma global evaluar la mecánica asociada al robot, sus interferencias y los algoritmos de locomoción libre que estamos investigando. Los resultados obtenidos nos permitirán una definición más clara para fabricar el prototipo de robot y su sistema de control.

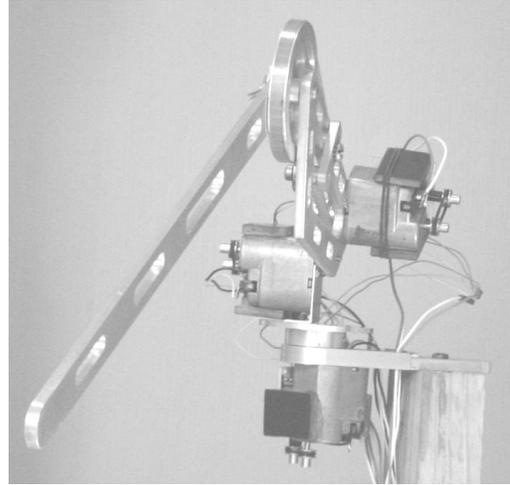


Fig. 12. Prototipo de pata del ROSEP-I

9. Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Dr. Guillermo Rodríguez Vilomara, Director de la Unidad de Posgrado del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), por las facilidades y el apoyo brindado para llevar a cabo el proyecto en la Unidad de Postgrado.

Referencias

- [1] Kumar V. and Waldron K., *A Review of Research on Walking Vehicles*, The Robotics Review 1, Ed. Khatib, Craig and T. Lozano-Pérez, The MIT Press, 1989.
- [2] Song, Vohnout, Waldron and Kinzel, *Computer-Aided Design of a Leg for an Energy Efficient Walking Machine*, Mechanism and Machine Theory Vol. 19, no. 1, pp 17-24, 1984.
- [3] Taber, Stephen W., *The World of the Harvester Ants*, W.L. moody natural history series:23, College Station, Tx., Texas A. & University, 1998.

- [4] **Kumar V., Gardner J.**, *Kinematics of Redundantly Actuated Closed Chains*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.6, No.2, April 1990.
- [5] **Raibert M. & Sutherland**, *Máquinas que Caminan*, Investigación y Ciencia, Marzo 1983.
- [6] **Pugh D., Robble E., Vohnout V., Bihari T., Walliser T., Oetterson M. & Waldron K.**, *Technical Description of the Adaptive Suspension Vehicle*, MIT, Vol 9, No.2, April 1990.
- [7] **Vargas E.**, *A New Real-Time Control Method for Free Locomotion in a Walking Robot*, Int. Journal of Computer Application in Technology, Vol.11, Nos.1/2, 1998.
- [8] **Arkin R.**, *Behavior-Based Robotics*, The MIT Press, 1998.
- [9] **Vargas E.**, *Free Locomotion Gaits for a Four Legged Machine*, Memorias del 1er.Congreso de Robótica, Torreón, Coahuila, México 1999.