



Simulación de un Robot Hexápodo Bioinspirado en el Tenebrio

Simulation of a Robot in Bio-Inspired Hexapod Tenebrio

Juan Pablo Rodríguez-Calderón, Est.

*Grupo de Investigación AUTOMATIZA,
Universidad Libre
Bogotá, Colombia
juanp.rodriguez@unilibrebog.edu.co*

María Fernanda Ramos-Parra, Est.

*Grupo de investigación AUTOMATIZA,
Universidad Libre
Bogotá, Colombia
mariaf.ramos@unilibrebog.edu.co*

Mauricio Vladimir Peña-Giraldo, MSc.

*Grupo de investigación AUTOMATIZA,
Universidad Libre
Bogotá, Colombia
mauriciov.penag@unilibrebog.edu.co*

(Recibido el 20-04-2015. Aprobado el 20-06-2015)

Citación de artículo, estilo IEEE:

J. P. Rodríguez-Calderón, M. F. Ramos-Parra, M. V. Peña-Giraldo, "Simulación de un Robot Hexápodo Bioinspirado en el Tenebrio", Lámpsakos, N° 14, pp. 33-39, 2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.21501/21454086.1636>

Resumen. Los insectos son base fundamental en el estudio de la robótica reactiva ya que estos poseen características biológicas y motrices que son de interés para ser implementadas en robots bioinspirados, teniendo en cuenta el desempeño de éstos en diferentes áreas. Por otra parte, los animales hexápodos poseen omnidireccionalidad y estabilidad, debido a la formación del trípode de apoyo, el cual se crea en sus patas al dar un paso, lo cual les permite sobrepasar diferentes obstáculos con facilidad y velocidad constante.

En este proyecto se implementa el sistema locomotor del insecto Tenebrio debido a la facilidad con que se pueden apreciar sus movimientos. Se analiza el desplazamiento de las patas del insecto en diferentes trayectorias, vistas y terreno plano, posteriormente se encuentran los parámetros, ecuaciones y restricciones que limitan los diferentes eslabones de cada una de las patas del Tenebrio, esto se realiza por medio de un análisis de imágenes. Finalmente la información recogida se implementa en la plataforma MATLAB para determinar las características de movimiento, estabilidad y desplazamiento.

Palabras clave: cinemática; estabilidad; hexápodo; simulación; trípode de apoyo.

Abstract. Insects are an essential foundation in the study of reactive robotics because they possess both biological and moving features that are of interest to implement bio-inspired robots, keeping into account their performance in different areas. However, hexapods animals have omnidirectional and stability, due to their formation as a tripod support, which creates their feet in order to take a step, allowing them to overcome different obstacles with ease at constant speed.

In this project it has been implemented an insect Tenebrio locomotor system, thanks to the ease to see their movements. Legs movement of insects is analyzed in all trajectories, lands, and views. Furthermore, formulation of both parameters, equations, and constraints are performed by limiting the various links of each of Tenebrio's leg. This was realized through image analysis. Finally, the information was collected and implemented in MATLAB in order to determine the characteristics of movement, as well as its stability and drive.

Keywords: kinematics; stability; hexapod; simulation; support tripod.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente los diseños de robots con patas han estado inspirados en insectos [1], [2], debido a la necesidad de suministrar una locomoción eficiente en superficies y espacios quebrados, los robots con patas a diferencia de los de ruedas permiten coordinación de movimientos y traslación similar a los insectos hexápodos que les proporciona una capacidad de adaptación al medio y desenvolvimiento en diferentes terrenos [3], [4], esta característica convierte a los robots bioinspirados en máquinas ideales para realizar tareas, como: servicios militares, detección de grietas, rastreo, exploración minera, etc.

Varios investigadores han dedicado sus estudios a robots caminantes por las ventajas y la capacidad de adaptación que tienen en diferentes espacios que son peligrosos para el hombre [5], [6]. Vale la pena resaltar algunos trabajos, ya que sobresalen por su profundidad en las investigaciones de bioinspiración en insectos:

Los robots caminadores tienen varias posibles aplicaciones, basadas en general, en su adaptabilidad cuando se desplazan por terreno irregular; en 2004 se realizó el estudio de (A. Arango, H. Correa y H. Satizábal) titulado *Diseño e Implementación de un Robot Móvil Hexápodo*, en este estudio se buscó crear un sistema locomotor basado en características propias de organismos vivos, especialmente insectos de 6 patas como hormigas, arañas o cucarachas, aprovechando las ventajas que estas puedan tener en determinados terrenos, mediante motores DC como articulaciones y microprocesadores para el control de estos. Se llegó a la conclusión de que las capacidades de libre movimiento se incrementarían aumentando la fuerza de las extremidades, proporcionando así la posibilidad de que el robot pueda cargar su batería para la alimentación de los motores, así como la adición de algunos sensores permitiría enriquecer la inteligencia del robot aumentando sus entradas para toma de decisiones [7].

Se han realizado varios estudios para analizar los limitados movimientos en las patas de los hexápodos, lo cual es de importancia para la formación del trípode en el movimiento del hexápodo; en 2005, un estudio realizado por (Y. Jung) titulado *Tripod Gaits for Fault Tolerance of Hexapod Walking Machines with a Locked Joint Failure*, analiza el trípode de apoyo durante la marcha y el rango de estabilidad sobre plano horizontal; de igual manera se estudió la ci-

nemática de cada una de las patas, para determinar el rango máximo y mínimo de movimiento durante la caminata. Se concluyó que para un buen desempeño del robot es necesario un análisis completo de la cinemática y dinámica, para que toda la parte de control y programación en el hexápodo pueda lograr una estabilidad y omnidireccionalidad en diferentes terrenos [8].

Las patas en los animales cumplen funciones de estabilidad y locomoción lo que les proporciona una gran adaptabilidad en el entorno; es por esto que en 2008 se realizó un análisis de (J. Chen and F. Lan) Titulado *Instantaneous Stiffness Analysis and Simulation for Hexapod Machines*, sobre la capacidad de carga del robot; para ello se analizó la rigidez estructural, el contacto entre la pata y el suelo, el centro de masa, la velocidad cuando el robot se mueve, para aumentar la precisión en cuanto al diseño y construcción. El análisis locomotor del robot se llevó a cabo mediante simulaciones para lograr la estabilidad y el control del robot. Se concluyó que para que el robot tenga un mayor rendimiento se debe tener precisión en el control de las extremidades del robot y adecuada rigidez, para tener mejor capacidad de movimiento así como velocidad constante durante la caminata [9].

Las máquinas con ruedas actualmente son empleadas debido a la velocidad y capacidad para desplazarse, pero estas sólo logran hacerlo en terreno regular; debido a esta desventaja varios investigadores iniciaron estudios en máquinas con patas por su capacidad para caminar sobre terrenos irregulares; es por esto que en la investigación de 2006 realizada por (S. Olaru & M. Nitulescu) y denominada *Stability Analysis Software Platform Dedicated for a Hexapod Robot*, se analizó la locomoción de las patas sobre terreno plano; se observó que el sistema presenta una serie de problemas en cuanto al control debido a la complejidad de lograr la estabilidad y coordinación de las patas en diferentes situaciones; es por esto que realizó la simulación para lograr la comprensión del control de las patas. La plataforma de simulación utilizada en este artículo es MATLAB; allí se analizó el polígono de apoyo de las patas que pierden contacto con el suelo y si el centro de masa que se encuentra dentro de este no sale del perímetro del trípode. Se pudo concluir que la plataforma de simulación permite un análisis en cuanto a estabilidad y control del robot, de igual manera ofrece un fácil manejo para los ángulos, masas y longitudes del robot [10].

Dentro de la programación y control de un robot hexápodo se encuentra una gran complejidad, debido a los diferentes sistemas de software que se implementan para el movimiento de las patas; es por esto que en el año 2009, se realizó una investigación por parte de (G. Carbone, A. Yatsun & M. Ceccarelli) titulado *Design and Simulation of Cassino Hexapod Robot*; allí se determinó el sistema locomotor, el cual consta de 18 motores DC adaptados a poleas y engranes para la reducción de velocidad, estos son controlados digitalmente por un PLC (Controlador Lógico Programable). Cada pata se conforma de varios módulos, estas cuentan con 4 grados de libertad que permiten al robot el movimiento y la estabilidad. El control se logra mediante un programa de computadora, el cual permite dirigir las patas mediante el uso del PLC. En el panel de control se encuentran 2 interruptores, uno se encarga de alimentar todo el sistema y el otro del movimiento de las patas, el PLC recibe las señales de los interruptores obteniendo así el mando de los diferentes motores del hexápodo. Se pudo concluir que el buen desempeño del robot se logra mediante un análisis completo de la cinemática y dinámica, para que toda la parte de control y programación en el hexápodo pueda lograr la estabilidad en diferentes terrenos [11].

2. METODOLOGÍA

El rasgo más determinante dentro la investigación es el movimiento de las patas del insecto del cual se desea inspirar, es por esto que se le dio un enfoque metodológico estructurado para su efectiva realización. La bioinspiración es la forma de emular sistemas mecatrónicos con características biológicas; para llevar a cabo esto se realizó una videometría implementada en la plataforma MATLAB para hacer un análisis de los movimientos del insecto en la caminata. Se realizaron los modelos matemáticos de la cinemática directa e inversa del insecto, evaluando sus parámetros y variables durante la marcha. La simulación se implementó para experimentar y describir el comportamiento de un sistema complejo del mundo real; debido a esto se realizó una representación CAD del insecto en SolidWorks que se vinculó a Simulink-MATLAB, para evaluar la similitud del sistema locomotor, trípode de apoyo y desplazamiento. Para obtener resultados aproximados a la realidad se realizaron pruebas con un prototipo diseñado con base en el tenebrio, en el que se emuló el movimiento de las patas del mismo.

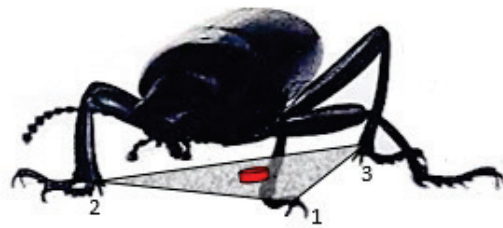


Fig. 1. Representación polígono de apoyo insecto tenebrio.
Fuente: Autores del proyecto.

2.1. Videometría

El análisis de las patas se realizó mediante una esquematización del movimiento de las extremidades del insecto en diferentes tiempos, para saber el momento en que cambian de posición y los ángulos que tiene cada eslabón de la pata cuando el animal está en movimiento, para luego hacer un análisis cinemático de las patas de acuerdo con la importancia, donde las extremidades medias son las de mayor importancia, ya que estas son las que realizan las funciones de impulso y dirección, las delanteras que son de dirección y las traseras que son solo de impulso.

2.2. Estabilidad

Para lograr estabilidad, los hexápodos cuentan con tres apoyos que le otorgan soporte y al mismo tiempo cuentan con otros tres que se encargan del movimiento para otorgarle una nueva posición.

El diseño del prototipo hexápodo que se estudia en este trabajo es un robot de 18 grados de libertad con 3 grados por pata respectivamente. El robot, basa su diseño en la anatomía del tenebrio (Fig. 1). Al estar en movimiento constante es necesario que las 3 patas de apoyo sean estáticamente estables para formar un trípode de apoyo dentro del cual se ubica su centro de masa, que está basado en la alternación de trípodes, en el momento en que las patas 1, 2 y 3 (Fig. 2) se encuentran en el suelo dando firmeza, las patas A, B y C se levantan para dar un paso cada una y realizar un cambio de posición.

3. MODELO CINEMÁTICA DIRECTA E INVERSA

En la Fig. 3 se encuentran las asignaciones correspondientes a cada articulación de los ejes coordenados para la implementación de los parámetros de Denavit-Hartenberg.

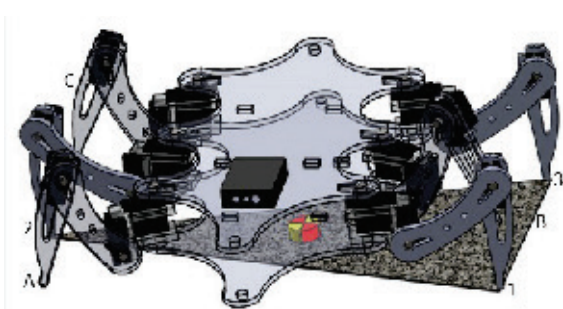


Fig. 2. Representación polígono de apoyo del modelo CAD. Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 1. Parámetros D-H

LINK	θ	d	a	α
1	0	0	X	0
2	θ_1	$-l_0$	0	$-\pi/2$
3	$-\pi/2 + \theta_2$	0	l_1	0
4	$\pi/2 + \theta_3$	0	l_2	0

Por medio de los parámetros de Denavit-Hartenberg (Tabla 1) se pueden obtener la matriz final de transformación homogénea de una pata (1):

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} -c_1(s_2s_3 - c_2c_3) & -c_1(c_2s_3 + c_3s_2) & s_1 & x + c_1c_2l_1 + c_1c_2c_3l_2 - c_1s_2s_3l_2 \\ -s_1(s_2s_3 - c_2c_3) & -s_1(c_2s_3 + c_3s_2) & -c_1 & y + c_2s_1l_1 + c_2c_3s_1l_2 - s_1s_2s_3l_2 \\ c_2s_3 + c_3s_2 & c_2c_3 - s_2s_3 & 0 & s_2l_1 - l_0 + c_2s_3l_2 + c_3s_2l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde c_1, s_1, c_2, s_2, c_3 y s_3 están dados por $\cos\theta_1, \text{sen}\theta_1, \cos\theta_2, \text{sen}\theta_2, \cos\theta_3$ y $\text{sen}\theta_3$ respectivamente. La matriz $T_4^0(1)$, hace referencia a un análisis cinemático directo desde la base y centro de masa hasta al extremo de la pata, proporcionando las coordenadas de la posición final de una pata en función de los parámetros y variables del movimiento angular de los eslabones.

En la Fig. 4 se encuentran cada una de las asignaciones realizadas para determinar la cinemática inversa de la pata.

$$X_i = x + c_1c_2l_1 + c_1c_2c_3l_2 - c_1s_2s_3l_2 \quad (2)$$

$$Y_i = y + c_2s_1l_1 + c_2c_3s_1l_2 - s_1s_2s_3l_2 \quad (3)$$

$$Z_i = s_2l_1 - l_0 + c_2s_3l_2 + c_3s_2l_2 \quad (4)$$

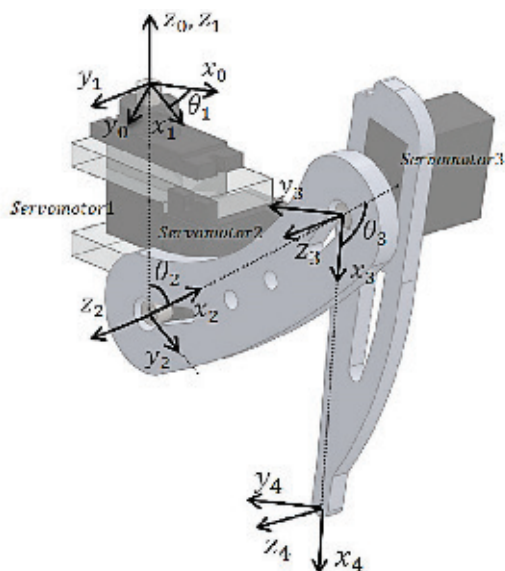


Fig. 3. Coordenadas cinemática directa. Fuente: Autores del proyecto.

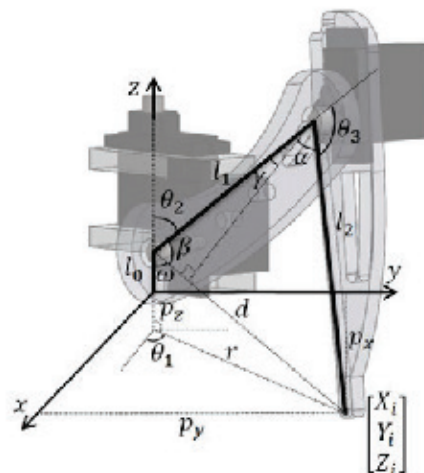


Fig. 4. Parámetros cinemática inversa. Fuente: Autores del proyecto

Donde X_i, Y_i y Z_i permiten determinar la posición variable del extremo de la pata en el plano y , y son los ángulos de la articulación (Fig. 3). Las ecuaciones de cinemática inversa de una pata, se definen por:

$$r = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (5)$$

$$d^2 = r^2 + (P_z + l_0)^2 \quad (6)$$

$$d = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + (P_z + l_0)^2} \quad (7)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \quad (8)$$

$$\omega = \tan^{-1}\left(\frac{r}{l_0 + P_z}\right) \quad (9)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{-l_2^2 + d^2 + l_1^2}{2l_1d}\right) \quad (10)$$

$$\theta_2 = \pi - \beta - w \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (12)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{l_1 \sin \beta}{l_2}\right) \quad (13)$$

$$\theta_3 = \pi - \gamma - \alpha \quad (14)$$

4. SIMULACIÓN

Mediante la simulación realizada en la plataforma SIMULINK-MATLAB se analizaron los parámetros de velocidad, desplazamiento angular y posición final de las patas, encontradas con la videometría y análisis cinemático del insecto; de igual manera se evaluó la formación del polígono de apoyo ya que este es importante durante la caminata del insecto al otorgar estabilidad y garantiza su omnidireccionalidad dentro de la marcha constante. Se realizaron pruebas para determinar características de similitud de movimiento con el insecto tenebrio, ya que es uno de los objetivos de este proyecto (Fig. 5 y Fig. 6).

En la Fig. 7 se pueden observar las gráficas de desplazamiento angular de una pata del insecto Tenebrio durante 5 ciclos de caminata constante, al superponerlas con las gráficas de desplazamiento angular de la simulación del modelo CAD (Fig. 8); se encontró que la similitud de movimiento es semejante, presentando una variante mínima, la cual no tiene un valor significativo dentro de su desplazamiento y estabilidad sobre el terreno.

En la Fig. 9 están representadas las gráficas del desplazamiento angular de una pata del prototipo durante 5 ciclos de marcha, donde se puede observar que el movimiento es similar al del insecto y modelo CAD, estando dentro del rango de grados y tiempo cuando se realiza el cambio de posición y alternación del trípode de apoyo.

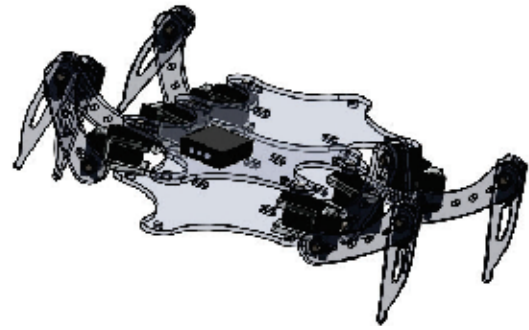


Fig. 5. Diseño CAD. Fuente: Autores del proyecto



Fig. 6. Simulación en plataforma Simulink. Fuente: Autores del proyecto.

El prototipo (Fig. 10) cuenta con 3 servomotores por pata de 4.8 V DC y 2 kg.cm de torque, que le proporcionan la libertad de movimiento, una tarjeta Arduino para la vinculación, programación y control de los servomotores mediante Simulink-MATLAB y una protoboard de 270 puntos para realizar las respectivas conexiones de señal y alimentación; de igual manera se emplearon las ecuaciones anteriormente descritas junto con los datos de la videometría, para la obtención de los parámetros y restricciones de movimiento del insecto tenebrio, para poder implementarlos al prototipo y así emular su comportamiento durante la caminata.

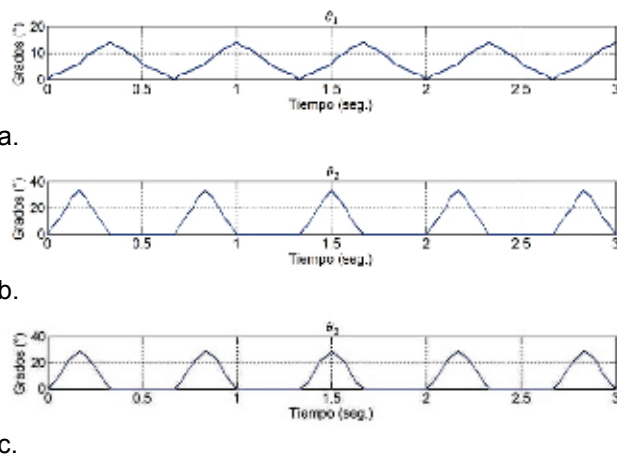


Fig. 7. Desplazamiento angular pata 1 insecto. Fuente: Autores del proyecto.

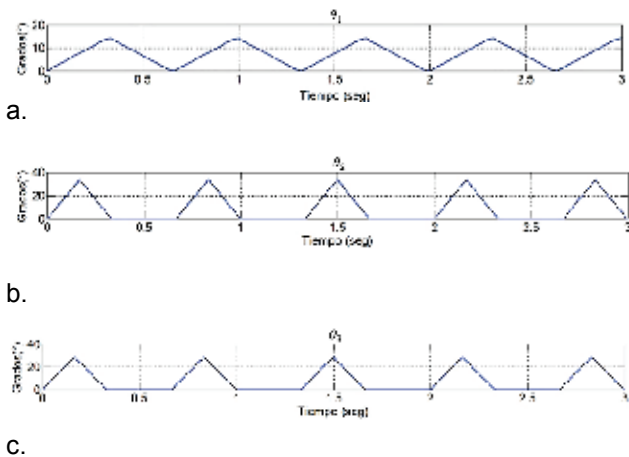


Fig. 8. Desplazamiento angular pata 1 modelo CAD. Fuente: Autores del proyecto.

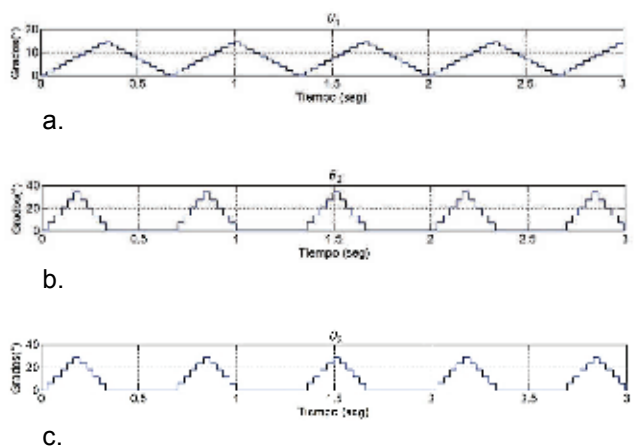


Fig. 9. Desplazamiento angular pata 1 del prototipo. Fuente: Autores del proyecto.

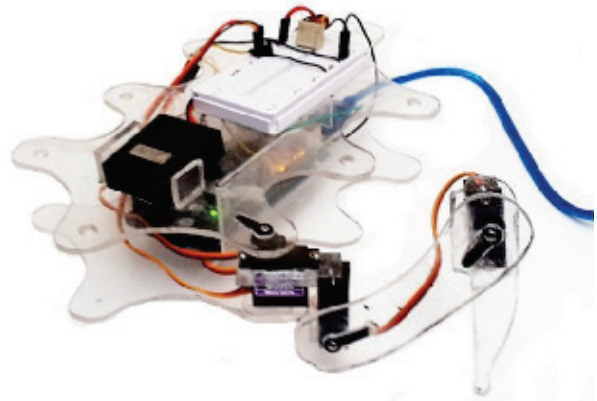


Fig. 10. Robot prototipo (Fuente: Autores del proyecto)

5. TRABAJOS FUTUROS

Los trabajos posteriores conllevarán a la dinámica e instrumentación del robot, donde se está realizando un análisis dinámico para poder obtener el modelo matemático, que describa las fuerzas y torques que actúan en las articulaciones con respecto a los centros de masa que están presentes en cada eslabón, para así poder realizar la simulación del modelo y obtener una descripción más detallada del movimiento, incorporando masas, distancias al centroide de cada eslabón del robot y sus respectivos momentos de inercia. Por otra parte, se pretende implementar en el prototipo un sensor de proximidad ultrasónico por su largo alcance, para así poder prever las colisiones con objetos que se encuentren en la trayectoria y así cambiar de dirección con anticipación, de igual manera una cámara inalámbrica que permita monitorear el entorno y sucesos que estén ocurriendo en tiempo real desde un ordenador operado por una persona.

6. CONCLUSIONES

Por medio de la videometría se pudieron determinar los parámetros de movimiento de las patas del insecto, contemplando un margen de error mínimo debido a la dificultad en la toma de vídeo por el tamaño del Tenebrio. El modelo matemático de la cinemática directa se adapta adecuadamente al movimiento de una pata del insecto al describir el desplazamiento angular de cada articulación y proporcionar las coordenadas de la posición final del extremo de la pata, de igual manera por medio de las ecuaciones de la cinemática inversa, se determinaron los parámetros

y coordenadas finales que proporcionan la nueva posición que tendrá el insecto al caminar. A partir de la simulación y la obtención de las gráficas se pudo demostrar que el diseño del prototipo es viable, ya que asemeja sus características y restricciones de desplazamiento angular a las de las patas del Tenebrio, asimismo se corroboró que el centro de masa permaneciera dentro de la formación del trípode de apoyo, aun cuando se hace la alternación para conservar la estabilidad. En el prototipo se analizó el movimiento de la pata 1, en el que se evaluaron características de movimiento de similitud con el insecto, al igual que se realizó una comparación de las restricciones y parámetros obtenidos del video del insecto y la simulación del modelo CAD con respecto a las pruebas realizadas con el prototipo.

REFERENCIAS

- [1] J. E. Vargas, "Diseño un Robot Hexápodo Tipo Hormiga" en *VIII Congreso Mexicano de Robótica, COMRob*. México, D.F., 2006, pp. 80-85. [Online] Disponible en: <http://www.profesaulosuna.com/data/files/ROBOTICA/CONTROL%20MATLAB%20ROBOT/evs-amrob06.pdf>. Agosto de 2015.
- [2] J. Ollervides, N. Pineda, A. Sáenz, V. Santibáñez y A. Dzul, "Sistema de Control de Locomoción de un Robot Hexápodo Caminante" en *Congreso Nacional de Control Automático*. Baja California, México, 2013, pp. 520-525. [Online] Disponible en: <http://eventos.cicese.mx/amca2013/papers/0179.pdf>. Agosto de 2015.
- [3] R. Campos, M. Vitor, & C. Santos, "Hexapod Locomotion a Nonlinear Dynamical Systems Approach" in *36th Annual conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Glendale, AZ, 2010, pp. 1546-1551. [Online] Disponible en: 10.1109/IECON.2010.5675454. Agosto de 2015.
- [4] R. R. Herrera, T. M. B. Cambray y J. F. S. Talamantes, "Robot Insecto Orientado a Comportamiento" en *VIII Congreso Nacional de Mecatrónica*. Veracruz, 2009, pp. 10-15. [Online] Disponible en: <http://www.mecamex.net/anterior/cong08/articulos/03.pdf>. Agosto de 2015.
- [5] G. Jianhua, "Design and Kinematic Simulation for Six-DOF Leg Mechanism of Hexapod Robot" in *International Conference on Robotics and Biomimetics*. Kunming, China, 2006, pp. 625-629. [Online] Disponible en: 10.1109/RO-BIO.2006.340272. Agosto de 2015.
- [6] Z. Jing, W. Jianhua, C. Weihai, & C. Wenjie, "Virtual Model Optimization and Locomotion Control of Bionic Hexapod Robot" in *7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Singapore, 2012, pp. 497-501. [Online] Disponible en: 10.1109/ICIEA.2012.6360779. Agosto de 2015.
- [7] A. Arango, H. Satizábal & H. Correa, "Diseño e Implementación de un Robot Móvil Hexápodo," *Revista Energía y Computación*, vol. 12, pp. 1-7, 2004. [Online] Disponible en: <http://hdl.handle.net/10893/1416>.
- [8] Y. Jung, "Tripod Gaits for Fault Tolerance of Hexapod Walking Machines with a Locked Joint Failure," *Revue Robotics and Automous Systems*, vol. 52, pp. 180-189, 2005. [Online] Disponible en: 10.1016/j.robot.2005.04.002.
- [9] J. Chen, & F. Lan, "Instantaneous Stiffness Analysis and Simulation for Hexapod Machines," *Revue Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 16, pp.419-428, 2008. [Online] Disponible en: 10.1016/j.simpat.2008.01.003.
- [10] S. Olaru and M. Nitulescu, "Stability Analysis Software Platform Dedicated for a Hexapod Robot", *Revue Advances in intelligent Control Systems and Computer Science*, vol. 187, pp. 143-156, 2013. [Online] Disponible en: 10.1007/978-3-642-32548-9_11.
- [11] G. Carbone, A. Yatsun, S. Yatsun and M. Ceccarelli. "Design and Simulation of Cassino Hexapod Robot". In 2009 13th WSEAS International Conference on SYSTEMS, pp. 301-307. [Online] Disponible en: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/rodos/SYSTEMS/SYSTEMS42.pdfA>