

Análisis para la simulación de modelos animales tipo hexápodo

Deisy Y. Forero^a, Pablo A. Mora^{a*}, Jair L. Loaiza^b, Rubén D. Hernández^b

^a Ingeniero. Facultad de Ingeniería, Programa de Mecatrónica, Universidad Piloto de Colombia. Bogotá, Colombia.

^b Magister. Facultad de Ingeniería, Programa de Mecatrónica, Universidad Piloto de Colombia. Bogotá, Colombia.

Recibido: 11 de marzo de 2013. Aprobado: 11 de marzo de 2015.

RESUMEN

La simulación de modelos animales se ha convertido en una opción ingenieril para implementar e innovar mecanismos en la industria. El análisis de la locomoción animal en especial de insectos abre muchas puertas a la robótica móvil, puesto que la forma de moverse por el área terrestre es totalmente diferente a la convencional, que ha sido a través de ruedas. Estos nuevos diseños permiten tener acceso y un mejor control del móvil en terrenos difíciles (montañosos, rocosos, etc.). Con el fin de crear un robot móvil, se diseñará y se construirá un prototipo fundamentado en el artrópodo de seis patas, también conocido como hexápodo. Uno de los objetivos que se tiene para la realización del prototipo es la utilización del menor número de actuadores posible de manera que se implemente un sistema mecánico, también se tendrá en cuenta el material de construcción de las piezas para optimizar el peso de manera que sea lo más liviano posible, sin afectar su estabilidad. En el presente artículo se muestra un estudio biológico y dinámico del hexápodo, como también los avances y desarrollos de prototipos que ya se han realizado hasta el día de hoy.

Palabras clave: locomoción, insectos, artrópodos, fisiología, morfología.

Analysis for simulation of type hexapod animal models

ABSTRACT

The simulation of animal models has become an option to implement engineering and innovating mechanisms in the industry. The analysis of animal locomotion, in particular insects, opens many doors to mobile robotics since the way to move on the land is totally different from the conventional system which has been through wheels. These new designs allow the access and better control of the mobile robot in difficult terrain (mountainous, rocky, etc.). In order to create a mobile robot, a prototype based on the six foot arthropod will be designed and built, also known as hexapod. One of the goals for the development of the prototype is the use of the fewest number of actuators as possible and in such a way that a mechanical system can be implemented. Also, the construction material of the parts to will be taken into account to optimize the weight so that it is as light as possible, without affecting its stability. In the present article the biological and dynamic study of the hexapod as well as the advances and developments of prototypes that have already been constructed so far are presented.

Key words: locomotion, insects, arthropods, physiology, morphology.

1. Introducción

A través de los años se han venido realizando avances a nivel de la robótica con la finalidad de mejorar los mecanismos utilizados para una mejor movilidad. A finales de los setenta se empezaron los desarrollos con las extremidades para movilizar robots (Cruse, 1979). Partiendo del análisis del movimiento de los animales terrestres se determinó una propuesta, la cual mejoró la versatilidad y efectividad de su locomoción (Kumar y Waldron, 1989).

Teniendo en cuenta los sistemas biológicos, se ha estudiado la locomoción de algunos de los animales

más comunes, para realizar diseños mecánicos con diferentes componentes que simulen el movimiento básico. Empresas como Festo han logrado simular movimientos complejos como el de una gaviota, de manera que con un mecanismo y con los modelos matemáticos adecuados hicieron la primera ave robótica que planea y emprende vuelo agitando sus alas, como lo hacen las verdaderas gaviotas; también, simularon y construyeron una raya de mar, una medusa, entre otros; llaman a esto: "robótica inspirada en la naturaleza" (Festo, 2011). Hoy en día la ingeniería se ha encontrado que implementar mecanismos basados en movimientos de la naturaleza es más complejo que diseñar un mecanismo cualquiera para suplir una necesidad determinada, debido a que estos

* Autor de correspondencia.
E-mail: pmora62@upc.edu.co (P.A. Mora)

movimientos por naturaleza son delicados y suaves, sin omitir su velocidad y/o fuerza. Por lo general, realizar estas imitaciones de la naturaleza requiere de análisis dinámicos y matemáticos.

Este artículo de revisión está enfocado en el estudio del movimiento de las patas de insectos terrestres como: arañas, hormigas, escorpiones, ácaros y cucarachas, entre otros (Irizarry, 2009). Debido a que tienen la misma locomoción en las patas para desplazarse de un lugar a otro, además por su ligero peso y pequeño tamaño logran moverse de una manera muy rápida y suave, sin hacer movimientos muy bruscos; específicamente se orienta en el análisis de hexápodos (6 patas) (Jianhua, 2006). Con el fin de generar nuevas formas de explorar terrenos poco asequibles y peligrosos en cuanto a su inestabilidad; para ello, estudiaremos primero el artrópodo de manera que conozcamos un poco más afondo su formación biológica; su análisis se hará por partes: cabeza, tórax y abdomen, todo esto con el fin de imitar lo más posible su locomoción estructural a la hora de desplazarse por los diferentes terrenos. Posteriormente, con base en el desarrollo que se tiene del tema, se presentarán algunos modelos (Alexander, 1990).

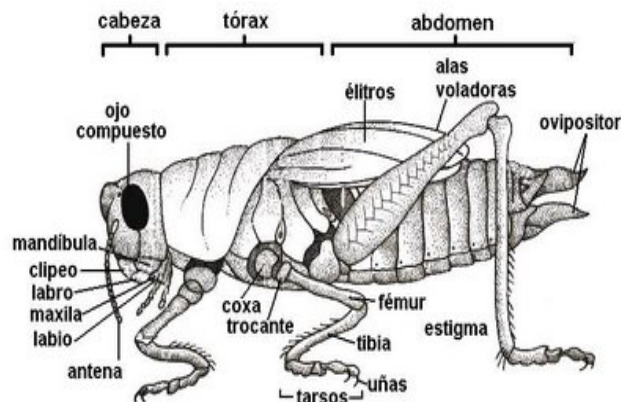
El principal objetivo es buscar una forma más eficiente para la imitación del animal, utilizando la menor cantidad de motores (motorreductores, servomotores, motores paso, etc.) y generar un diseño lo más liviano posible. Para, finalmente, crear un diseño nuevo basado en el movimiento del animal y teniendo en cuenta lo que ya ha sido construido por diferentes investigaciones, de manera que se puedan determinar los mecanismos, piezas y materiales que se van a utilizar para el prototipo, luego de simular lo correspondiente a la mecánica, teniendo un cálculo aproximado de lo que va a pesar la parte de control. Este prototipo está enfocado principalmente en el diseño mecánico, no significa que no se vaya a realizar estudio y diseño de la parte electrónica.

2. Contenido

2.1. Estudio biológico de los insectos hexápodos

Los artrópodos constituyen la mayoría de la población animal, debido a su morfología y fisiología son más resistentes en todo tipo de situación. Específicamente, los insectos son los más abundantes en la categoría de los artrópodos, y cumplen con ciertas características fundamentales que permiten identificarlos (Klaassen *et al.*, 2002; Toro *et al.*, 2003): tienen dos antenas en la cabeza y seis patas (la distribución y forma de las patas depende de la necesidad a la que se haya adaptado), son terrestres

y respiran por tráqueas, que son tubos situados en el abdomen por los que recogen el aire (Espenschied *et al.*, 1996). La biología se ha encargado de darle una distribución al cuerpo de los insectos, dicha distribución está dada por: cabeza, tórax y abdomen y un esqueleto exterior que los protege como si llevaran una armadura, este esqueleto también es conocido como exoesqueleto (Gómez, 2009). Es importante recordar o dar a conocer que los insectos son animales invertebrados (sin huesos).



Fuente: Klowden (2007).

Figura 1. Distribución del cuerpo y sus principales partes.

La cabeza está compuesta por dos antenas que por lo general son la parte con la cual interactúan con el medio exterior percibiendo olores, climas y en algunos hay sentido del tacto; tienen también dos ojos compuestos, que están formados por cientos de facetas, también cuentan con una boca para alimentarse, esta tiene formas diferentes y depende de qué se alimenten (masticar, chupar, lamer o picar) (Beutelspacher, 1994; Nelson *et al.*, 1997). En el tórax se encuentran las patas, son seis, las cuales se distribuyen por pares y en varias ocasiones tienen pelos o uñas que brindan sentido del tacto. Las alas en algunos casos están incluso por pares, aunque no funciona un par de ellas, esto hace que sean los únicos invertebrados que vuelan; no todos los hexápodos tienen alas y el que las tenga no significa que las utilice o funcionen. Por último, encontramos el abdomen en donde se encuentran los órganos reproductivos y el aparato digestivo; en insectos como las abejas o avispas también se encuentra el aguijón que es un arma de defensa (Fuentes y Lluinquinga, 2005).

2.2. Clasificación por tipo de patas

Una de las ventajas de los insectos es su facilidad de cambiar su fisiología y adaptarse a determinado

ambiente. Con el pasar de los años los insectos encontraron una necesidad para suplir, lo que los llevó a encontrar una forma de alimentarse, reproducirse y desplazarse por los medios en donde habitan. Las temperaturas, terrenos y diferentes alturas con respecto al mar clasifican los artrópodos, puesto que no es lo mismo un insecto de una selva tropical que uno de un páramo; aunque este tipo de clasificaciones son importantes no son de incumbencia para la realización del prototipo. En la Tabla 1 se puede observar la organización básica que se le asignó a los hexápodos por su tipo de patas, ya que este es su medio para desplazarse por los terrenos que se les presenten.

Tabla 1

Clasificación de hexápodos por su tipo de patas y funcionalidad

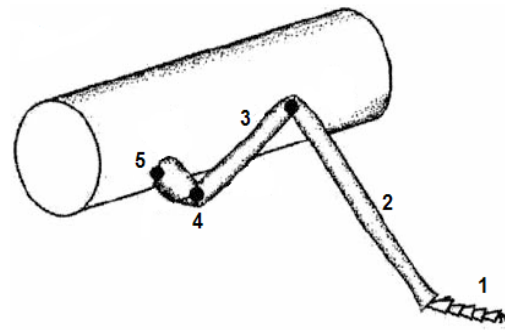
Tipo	Función y ejemplo
Cursorial	Correr - Cucaracha
Saltorial	Brincar - Saltamontes
Fosorial	Excavación - Cucarrón
Raptorial	Recoger - Mantis
Natorial	Remo para nadar - Chinche
Corbicular	Recolectora de polen - Abeja

Fuente: Jianhua (2006).

2.3. Análisis de la locomoción básica desde el punto de vista biológico

2.3.1. División por extremidades de las patas

Nos enfocamos ahora en el estudio del tórax y, específicamente, en el funcionamiento y locomoción de las patas que se especializan en correr a grandes velocidades desde la perspectiva del insecto. Para que el insecto mueva sus patas necesita una gran coordinación motriz; las articulaciones del insecto son simples y se mueven en un solo plano desde la perspectiva de cada una; uniendo todas las articulaciones y partes del apéndice (se llama apéndice a las extremidades, estructuras y sistemas del animal invertebrado, en este caso los apéndices son las patas) se obtiene un movimiento tridimensional (Argote *et al.*, 2009). Los movimientos y limitantes principalmente dependen de la actividad neuronal para controlar los músculos de los apéndices; a pesar de que el acto de caminar es relativamente sencillo, en lugares o terrenos desiguales en nivel, requiere de mucha habilidad motriz.



Fuente: Klowden (2007).

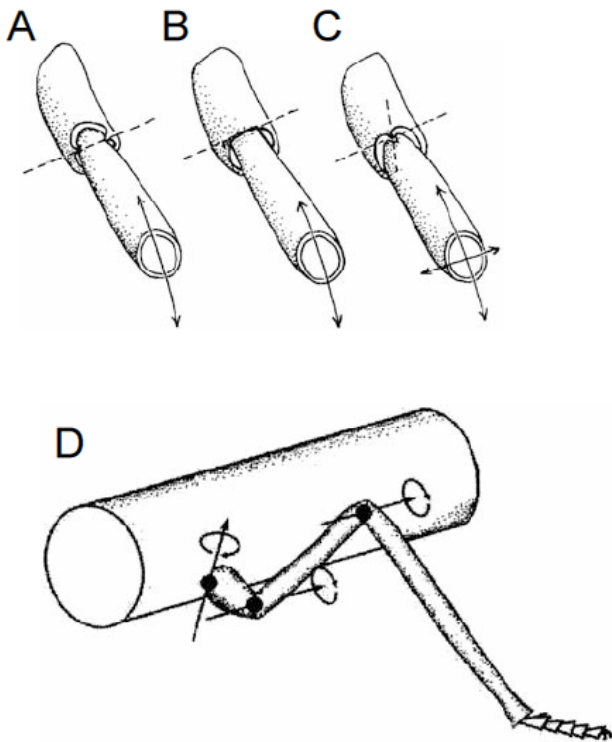
Figura 2. Las partes de la pata: torso (1), tibia (2), fémur (3), trocánter (4) y coxa (5).

Ahora bien, se hace una división de la pata, para conocer sus partes básicas de manera que podamos analizar y hacer un paralelo entre las piezas que se van a diseñar y usar posteriormente para ejecutar la simulación del artrópodo. En la Figura 2 pueden verse las partes del apéndice; el torso es el apoyo (flexible) directo que tiene para hacer contacto con el terreno; la tibia y el fémur están compuestos por músculos y unidos por una coyuntura; el trocánter es un pedazo de apoyo y al mismo tiempo una articulación que lo une con el fémur; estas partes son como un sistema de eslabones, que permiten al hexápodo manejar el nivel de la altura a la que se encuentran del suelo; si hacemos una comparación con un vehículo automotor, todo este sistema funciona básicamente igual que un amortiguador. Finalmente se encuentra la coxa, que es una articulación rotacional que hay entre toda la pata y el tórax del insecto (Pérez y Gauthier, 2005).

2.3.2. Articulaciones, posiciones y apoyos utilizados para desplazarse

Las coyunturas o articulaciones, como ya se mencionó, se pueden mover en dos planos no más. En la Figura 3 podemos observar los grados de libertad que pueden tener las diferentes patas.

El primer movimiento (A) es vertical con una limitación, solo puede ir hacia arriba por que en la parte inferior tiene un tope que hace que el apéndice quede paralelo a la sección que está sujeto; en el segundo (B) no hay ningún limitante y puede subir y bajar hasta donde se le permite; el tercero (C) es un movimiento rotacional que básicamente permite girar al apéndice abajo, arriba, derecha e izquierda, también se pueden hacer movimientos combinados. En la imagen (D) se muestra una pata con todas las articulaciones y grados de libertad que tiene cada coyuntura.



Fuente: Klowden (2007).

Figura 3. Tipos de articulaciones de los artrópodos. Punto de pivote (A), punto de giro vertical (B), conjunto monoarticulado (C), articulaciones cuerpo completo (D).

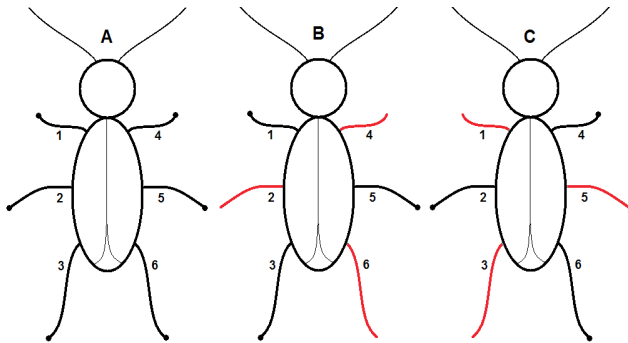


Figura 4. Posiciones de las patas en movimiento. Posición de equilibrio-estático (A), primera posición al caminar (B), segunda posición al caminar (C).

Mientras el insecto se encuentra quieto (estático) sus seis patas soportan su cuerpo y se equilibra de manera que todos sus músculos ejerzan la misma fuerza; de esta manera, evita el cansancio o agotamiento de un solo apéndice. Cuando un insecto camina usa tres de sus seis patas (un trípode) para apoyarse, las otras tres se encuentran girando en el sentido que se esté moviendo, de manera que mientras en un lado la pata de la mitad está apoyada, en el otro lado está flotando y al mismo

tiempo gira hacia delante, la superior e inferior están apoyadas. Luego alterna las patas y ocurre el cambio de patas, las que se encontraban flotando y girando ahora se apoyan, mientras las otras se elevan; este proceso se repite periódicamente hasta que el hexápodo logra llegar a su destino (Jianhua, 2006).

Algo que vale la pena resaltar y dar a entender, es la forma en que los hexápodos giran su cuerpo bien sea para la derecha o izquierda, el movimiento básico se mantiene; el truco para girar está en la fuerza con que empujan las patas del lado contrario al que quieren rotar. Para entender mejor este fenómeno se utiliza la numeración de patas que se tiene en la Figura 4: si el insecto quiere ir a la derecha y se encuentra en la posición B, debe ejercer mayor fuerza en los músculos de la pata 2; en el otro caso, que es cuando está en la posición C y suponiendo también que desea girar así la derecha, debe realizar mayor fuerza en las patas 1 y 3. De manera que utilice una de las patas como apoyo y eje de rotación, sin embargo hay que tener en cuenta que este no es un apoyo fijo, es más un apoyo momentáneo, puesto que no va dejar de alternar las patas para seguir avanzando.

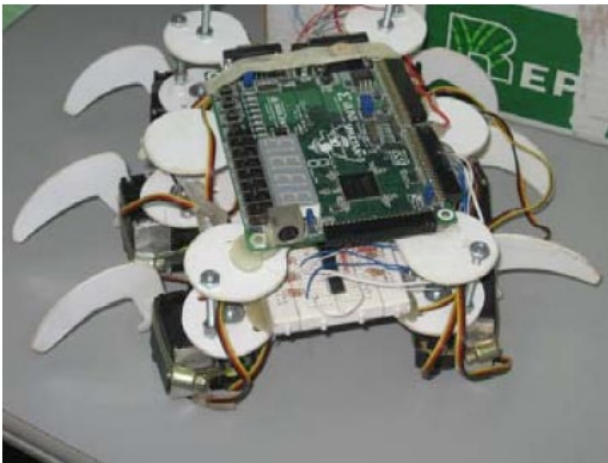
2.4. Desarrollos y avances en la simulación del modelo animal

Acerca del tema ha habido muchas investigaciones y propuestas de solución para dicha modelación; se mencionarán algunas que han arrojado buenos resultados (que funcionaron tanto en la parte mecánica como electrónica) (Bailey *et al.*, 2000). La gran mayoría de diseños utiliza mínimo un actuador por cada pata; como uno de los objetivos es hacer uso de la menor cantidad de motores posibles, se diseñará posteriormente un mecanismo que reemplace dichos actuadores reduciendo la cantidad; por ahora, se enfocará el estudio al movimiento de las articulaciones principales de cada diseño.

2.4.1. Robot móvil caminador hexápodo con 12 grados de libertad

En este proyecto, como el título lo indica, tiene 12 grados de libertad. Cuando se habla de grado de libertad, se hace mención de la articulación y el movimiento que puede realizar independientemente de cómo lo haga. Por cada pata tiene 2 grados de libertad, uno le permite subirla y bajarla para apoyarse y el otro grado de libertad es para girarla hacia adelante o atrás. La estructura de este robot móvil fue hecha en polietileno de color blanco calibre 100, un material resistente, de fácil manipulación, también es un material liviano; este prototipo cuenta con 12 servomotores (2 por cada pata).

La función de la base superior es soportar y llevar una tarjeta de desarrollo FPGA (del inglés Field Programmable Gate Array, correspondiente a un dispositivo que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionabilidad puede ser configurada) XILINX® SPARTAN 3; la base inferior contiene el circuito de opto-acopladores y es el apoyo de las extremidades del hexápodo. Este diseño es robusto, y gracias a su peso brinda más estabilidad a la estructura en general (Festo, 2011; Fielding *et al.*, 2001). Cada pata está sujeta directamente al motor, por lo tanto no hay pérdidas de energía y no hay fricción entre piezas mecánicas. Es un modelo robusto y poco eficiente viéndolo desde el punto de vista mecánico, pero el diseño electrónico y de control es muy eficaz y responde ante cualquier terreno que se le presente, siempre y cuando esté dentro de los parámetros que este soporta. Este prototipo fue construido por estudiantes de Ingeniería Electrónica de la Universidad de los Llanos en Villavicencio (Colombia).



Fuente: Calle *et al.* (2009).

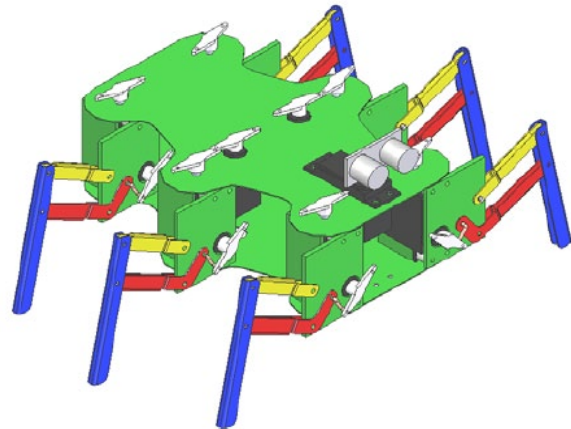
Figura 5. Vista sobre los alcances físicos logrados en la construcción del prototipo.

2.4.2. Diseño y construcción de un robot móvil hexápodo

Este prototipo hecho en la Universidad de los Andes (Fielding *et al.*, 2001), fue diseñado con el objetivo de hacerlo estable y de fácil producción por los métodos convencionales de fabricación que se utilizan en el país; está bio-inspirado en los artrópodos. Esta máquina está compuesta de dos partes primordialmente, el chasis o cuerpo y el mecanismo de accionamiento de las patas, que son las encargadas de soportar y movilizar el robot. Para generar este diseño, cumplieron con dos requisitos: el primero es que cada pata tuviera la capacidad de levantarse a determinada altura para franquear pequeños obstáculos, y el segundo es que

debe tener dos grados de libertad en cada pata: uno para la elevación del suelo y cumplir con el primer requisito, y el otro para generar el desplazamiento horizontal sobre el terreno.

Además, desarrollaron un modelo de software para la simulación dinámica con el fin de analizar esfuerzos, deformaciones e interferencias, apoyados en la metodología de elementos finitos. Ese modelo sirvió para los mecanismos de las extremidades y para la estructura; a partir de los resultados obtenidos recalcaron y rediseñaron las piezas para obtener la estructura liviana, funcional y mecánicamente adecuada para hacer este prototipo lo más eficiente posible (Espenschied *et al.*, 1996; Hu, 2008, Fuertes C.A *et al.* 2005, Vargas E. *et al.* 2002). Sin embargo, la parte electrónica para los servo motores sigue siendo un problema en cuanto a peso, tamaño y cableado, puesto que requiere de mucho campo, tener un buen sistema de control, y tener acceso a microtecnologías es bastante costoso y poco convencional en el campo laboral del estudiante. Este proyecto fue realizado por los ingenieros Alexander Pérez y Alain Gauthier, estudiantes de Maestría en Ingeniería Electrónica de Computadores de la Universidad de los Andes.

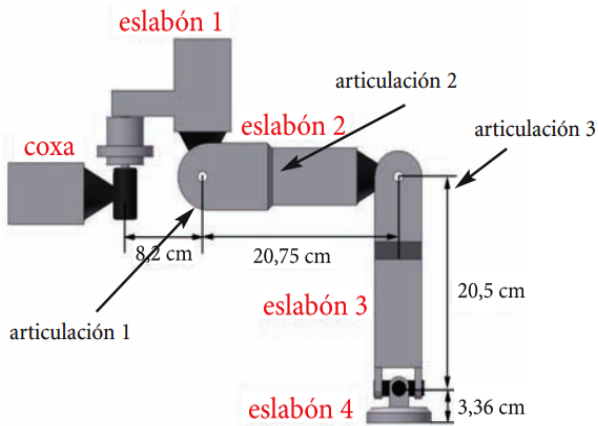


Fuente: Fielding *et al.* (2001).

Figura 6. Resultados del diseño y prototipo simulado.

2.4.3. Robot escalador para mantenimiento y limpieza de edificios

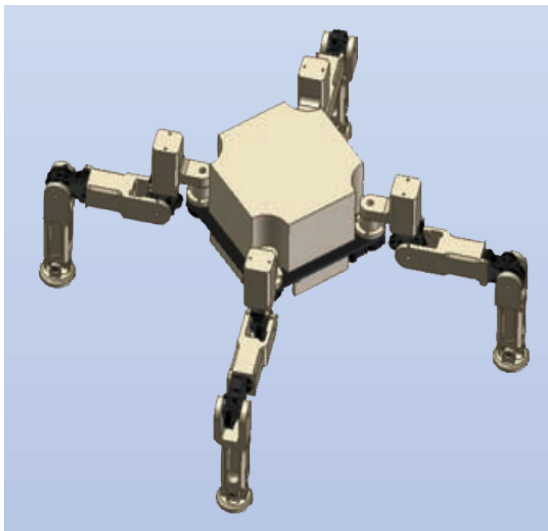
REMLLED es un robot el diseñado con la finalidad de innovar en el ámbito de la limpieza y mantenimiento de fachadas de edificios de múltiples niveles, siendo así un robot escalador, evitando las complicaciones de este trabajo. Su estructura básica está conformada por un cuerpo de cuatro patas las cuales están unidas por articulaciones, permitiendo la rotación tal como se muestra en la figura 7 (López *et al.*, 2011; Raibert y Hodgins, 1993).



Fuente: Raibert y Hodgins (1993).

Figura 7. Diseño mecánico inicial de la pata de REMLED.

Posee una libertad de 12 grados sobre todo el sistema; sus extremidades están dispuestas de forma simétrica en cada esquina, obteniendo así su eje central y poder distribuir los esfuerzos en cada una de las patas. Se desarrollaron los modelos cinemáticos y dinámicos para determinar las variables para la construcción del robot, tales como altura de paso, longitud y esfuerzos.



Fuente: Raibert y Hodgins (1993).

Figura 8. Diseño final de REMLED.

El diseño mecánico final tiene en cuenta la geometría de los actuadores puestos sobre el robot para ser más exactos, por tanto hubieron modificaciones mecánicas para lograr un buen acople. Este robot fue realizado por los ingenieros Eduardo Calle, Santiago Israel Ávila y Julio César Zambrano, pertenecientes a la Unidad de Investigación de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador.

3. Modelación dinámica de móviles ya construidos

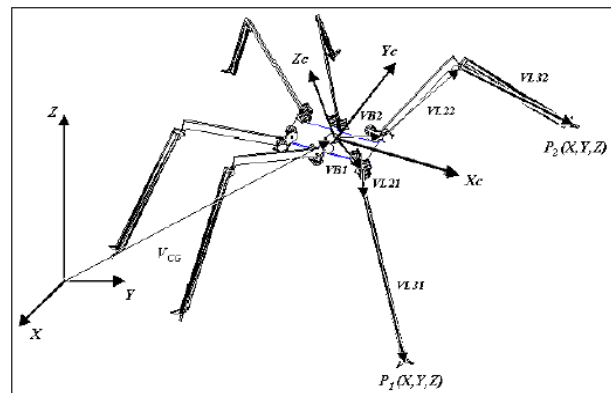
3.1. Dinámica a partir del modelo energético de Lagrange

Este proyecto fue enfocado en el desarrollo, análisis e investigación de un robot móvil llamado: ROSEP-1 (*Robot de SEis Patas*); el modelo cinemático se basa en las ecuaciones que determinan la posición y orientación del cuerpo, tomando en cuenta la posición final que adoptan las patas sobre un terreno irregular (Sánchez-Cruz, 2003; Song *et al.*, 2005). En la Figura 7 se muestra el sistema de referencia inercial colocado en el cuerpo, a partir de este sistema se muestran las posiciones vectoriales de las patas (Argote *et al.*, 2009; Ayers *et al.*, 1994; Full *et al.*, 2000). La ecuación que utilizaron para determinar la posición de la *i*-ésima pata es la (1):

$$\vec{V}_{PI} = \vec{V}_{GG} + \vec{V}_{BI} + \vec{V}_{L2I} + \vec{V}_{L3I} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{PI} \quad (1)$$

Donde V_{PI} representa al vector de posición de la pata, V_{CG} es el vector de posición del centro de gravedad del cuerpo con respecto al sistema de referencia inercial. El vector V_{PI} es la posición de la base de la *i*-ésima pata medida desde el centro de gravedad del robot, V_{L2I} es el vector que representa la posición de la segunda articulación del robot y V_{L3I} es para la tercera articulación o grado de libertad (Ayers *et al.*, 1994; Full *et al.*, 2000).

Para el diseño del control se necesitó conocer el modelo dinámico de cada pata del robot; todos estos análisis se realizaron a partir del modelo energético de Lagrange (Bo-Zhao *et al.*, 2011; Saranlı *et al.*, 2001; Yang, 2006).



Fuente: Sánchez-Cruz (2003).

Figura 9. Relaciones vectoriales con respecto al sistema de referencia inercial.

En la ecuación (2) se ve la relación que utilizaron entre la energía interna y externa de la pata, donde K representa la energía cinética del sistema mecánico y U representa la energía potencial.

$$L = K - UL = K - U \quad (2)$$

En la siguiente ecuación muestran la relación fundamental entre el torque y la fuerza generalizada correspondiente a cada pata:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_n} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_n} = \tau \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_n} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_n} = \tau \quad (3)$$

Posteriormente, se realizaron los cálculos matriciales de los sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales (4):

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & 0 & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \dots \\ + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{21} & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{22} & f_{23} \\ 0 & 0 & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 g \\ m_2 g \\ m_3 g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Luego de este desarrollo se obtuvieron los coeficientes de la matriz de inercia utilizados en la ecuación (4) (Bribiesca, 1996; Brooks, 1989; Xin *et al.*, 2006). Esta es una manera de darle solución al análisis dinámico.

3.2. Matrices de transformación

Como objetivo principal de los estudiantes de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Beer *et al.*, 1992; Blickhan y Full, 1987; Jiang, 1994), se construyó un robot tipo hexápodo con 12 grados de libertad; específicamente tiene dos articulaciones por pata, una le permite levantar o bajar la extremidad y la otra es para avanzar linealmente en el terreno (adelante o atrás) (Full, 1993; Voth, 2002). En la Figura 10 se pueden detallar los grados de libertad y diseño que se le dio a la pata (Cavagna *et al.*, 1975; McGhee y Frank, 1968; Pfeiffer *et al.*, 1994).

El punto P de contacto de la pata con el suelo, es el resultado de operaciones de traslación y rotación con respecto al eje de referencia (para este caso el centro geométrico del cuerpo del robot) y los movimientos rotacionales de los ejes X y Y (Galemann *et al.*, 2001; Gonzalez *et al.*, 2007). Para un sistema matricial de coordenadas homogéneas, la ecuación de traslación es (5):

$$T(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

En donde: Δx , Δy , Δz son las distancias entre los sistemas locales de coordenadas.

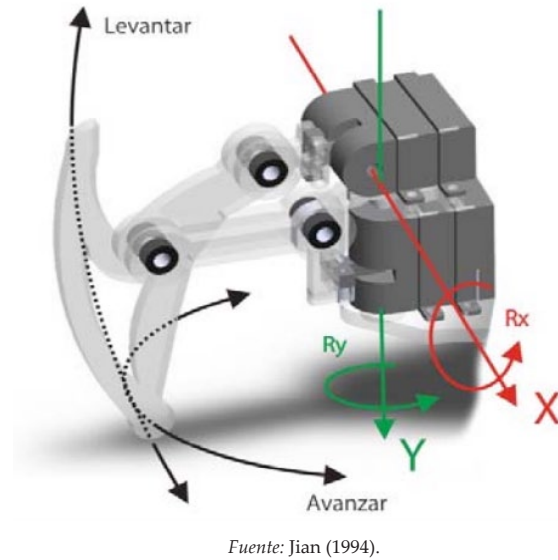


Figura 10. Grados de libertad de cada pata.

Las transformaciones de rotación en coordenadas homogéneas se muestran en las ecuaciones (6) y (7) (McGeer, 1990; Nelson y Quinn, 1996; Pérez, 2009):

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

En donde:

θ = es el valor angular de la articulación levantar/bajar.
 α = es el valor angular de avance.

Por lo que en cinemática directa la ecuación que define el avance de una pata es:

$$P = T(\Delta x, \Delta y, \Delta z) R_y(\alpha) T(\Delta x, \Delta y, \Delta z) R_x(\theta) \quad (8)$$

Con esta ecuación fue posible determinar los rangos de operación de los motores de levantar y avance para coordinar el paso de una pata (Binnard, 1995; Li-Yujun y Wang-Ting, 2012; Price, 1998).

4. Conclusiones

Ya que la ingeniería hoy en día busca nuevas formas de movilidad por terrenos inasequibles diferentes a la forma más conocida que es por medio de ruedas, el diseño de los nuevos móviles se basa en las estructuras del medio ambiente, debido a su simplicidad pero amplio margen de adaptabilidad en terrenos. En este artículo se presentó un estudio desde la parte biológica hasta el análisis dinámico del funcionamiento y locomoción del insecto-artrópodo de seis patas (hexápodo); los modelos dinámicos están fundamentados en robots que ya se construyeron.

Para empezar, se realizó un pequeño estudio de la morfología del insecto y posteriormente se buscó una clasificación por tipo y funcionalidad de apéndices, encontrando artrópodos que se desplazan por el agua superficialmente (sin sumergirse), también hexápodos que tienen como función saltar. Este estudio, se especializó en el artrópodo que corre utilizando sus patas como trípodes para avanzar y a su vez mantener la estabilidad en el terreno por el que circula. Acerca de este tema ha habido muchas investigaciones y soluciones para la imitación del modelo animal; la documentación se escogió a partir de los buenos resultados de unos de los prototipos ya construidos.

Referencias

- Alexander R.McN. (1990). Three uses for springs in legged locomotion. *International Journal of Robotics Research*, 9(2):53-61.
- Argote I., Castellanos D., Vargas J., Baquero A., Borrero H. (2009). *Robot móvil caminador hexápodo con 12 Grados de libertad*. Universidad de los Llanos, Colombia. pp. 2-3.
- Ayers J., Kashin S., Blidberg D.-R., Massa D. (1994). Biologically-based underwater robots. *Unmanned Systems*, 12:30-36.
- Bailey, S.A., Cham J.G., Cutkosky, M.R., Full R.J. (2000). *Comparing the locomotion dynamics of the cockroach and a shape deposition manufactured biomimetic hexapod*. Center for Design Research, Department of Mechanical Engineering, Stanford University. pp. 12-15.
- Beer R.D., Chiel H.J., Quinn R.D., Espenschied K.S., Larsson P. (1992). A distributed neural network architecture for hexapod robot locomotion. *Neural Computation*, 4:356-365.
- Beutelspacher C.R. (1994). *Insectos, reptiles, anfibios y peces*. Río Elba 20, col. Cuauhtémoc.
- Binnard M.B. (1995). *Design of a small pneumatic walking robot*. M.S. Thesis, MIT.
- Blickhan R., Full R.J. (1987). Locomotion energetics of the ghost crab: II. Mechanics of the centre of mass during running and walking. *J. Exp. Biol.*, 130:155-174.
- Bo-Zhao J., Li-jun Z., Jia-Lin Z., Cheng Ch., Sha H. (2011). *Design of the control system for a hexapod walking robot*. The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control. pp. 1-4.
- Bribiesca E. (1996). Measuring 3-D shape similarity using progressive transformations. *Pattern Recognition*, 29(7):117-129.
- Brooks A. (1989). A robot that walks: emergent behaviors from a carefully evolved network. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:253-262.
- Calle E., Ávila S.I., Zambrano J.C. (2009). REMLED I: robot escalador para mantenimiento y limpieza de edificios. *Revista de la Facultad de Ingenierías UIPS*. Ecuador. pp. 37-48.
- Cavagna G.A., Heglund N.C., Taylor C.R. (1975). Walking, running, and galloping: mechanical similarities between different animals, scale effects in animal locomotion. *Proceedings of an International Symposium*. pp. 111-125.
- Cruse H. (1979). The control of the anterior extreme position of the hindleg of a walking insect, *Carausius morosus* *Physiological entomology*. pp. 124-124.
- Espenschied K.S., Quinn R.D., Beer R.D., Chiel H.J. (1996). Biologically based distributed control and local reflexes improve rough terrain locomotion in a hexapod robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 18(1-2):59-64.
- Festo-Innovation and Technology. (2011). *Aerodynamic lightweight design*. Corporate Information. Projects.
- Fielding R., Dunlop R., Damaren C.-J. (2001). Hamlet: force/position controlled hexapod walker - design and systems. *IEEE Conference on Control Applications-Proceedings*. pp. 984-989.
- Fuertes C.A., Llumiangua R.P. (2005). *Diseño e implementación de un robot móvil tipo hexápodo teledirigido*. Facultad de Ing. Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí - Ecuador. pp. 43-57.
- Full R.J. (1993). Integration of individual leg dynamics with whole body movement in arthropod locomotion. En: *Biological neural networks in invertebrate neuroethology and robotics*. Beer R.D., Ritzmann R.E., McKenna T. (Eds.). New York: Academic Press.
- Full R.J., Farley C.T., Winters J.M. (2000). Musculoskeletal dynamics in rhythmic systems - a comparative approach to legged locomotion. En: *Biomechanics and Neural Control of Posture and Movement*, 192-205.
- Galemann B., Scholl K.-U., Berns K. (2001). Behavior control of LAURON III for walking in unstructured terrain. *International Conference on Climbing and Walking Robots*. pp. 651-658.
- Gómez H., (2009). *Phylum Arthropoda*. Escuela preparatoria-Lic. Benito Juárez García.
- Gonzalez P., Cobano J.A., Garcia E., Estremera J., Armada M.A. (2007). A six-legged robot-based system for humanitarian demining missions. *Mechatronics*, 17(8):417-430.
- Hu S. (2008). *Research on key techniques on the straight walking of hexapod robot*. Hangzhou, Zhejiang University. pp. 14-21.
- Irizary J. (2009). *Los Insectos*. Universidad de Puerto Rico en Utuado. pp. 13-14.
- Jiang S. (1994). *Robotics introduction*. Liaoning: Liaoning Sci-Tech Press, Chinese. pp. 29-75.
- Jianhua G. (2006). Design and kinematic simulation for six-DOF leg mechanism of hexapod robot. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Kunming, China. pp. 1-5, 8-16.
- Klaassen B., Linnemann R., Spennberg D., Kirchner F. (2002). Biomimetic walking robot SCORPION: control and modeling. *Robotics and Autonomous Systems*, 41(2-3):69-76.
- Klowden M.J. (2007). *Physiological systems in insects*. University of Idaho-Moscow. pp. 462-521.
- Kumar V., Waldron K.J. (1989). A review of research on walking vehicles. En: *The robotics review 1*. Khatib O., Craig J.J., Lozano-Pérez T. (Eds.). The MIT Press. pp. 243-266.
- Li-Yujun J., Wang-Ting W. (2012). *Design of a hexapod robot*. Department of Computer and Information Science, Southwest University. pp. 1-4.

- López E., Betancourt J., Martínez H., Ancira D., Ramírez F. (2011). *Diseño y construcción de un robot hexápodo*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ing. Mecánica y Eléctrica. pp. 1-10.
- McGeer T. (1990). Passive dynamic walking. *IJRR*, 9: 62-82.
- McGhee R.B, Frank A.A. (1968). On the stability properties of quadruped creeping gaits. *Mathematical Biosciences*, 3: 331-351.
- Nelson G.M., Quinn R.D. (1996). A Quasicoordinate formulation for dynamic simulation of complex multibody systems with constraints. En: *Dynamics and control of structures in space, III*. Kirk C.L., Inman D.J. (Eds.). pp. 523-538.
- Nelson G.M., Quinn R.D., Bachmann R.J., Flannigan W.C. (1997). *Design and simulation of a cockroach-like hexapod robot*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Case Western Reserve University. pp. 1-6.
- Pérez A., Gauthier A. (2005). *Diseño y construcción de un robot móvil hexápodo*. Facultad de Ing. Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá. pp. 3-5.
- Pérez J., Gauthier A. (2009). *Generación de locomoción de un robot hexápodo usando dos células neuronales analógicas*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca-México. pp. 21-50.
- Pfeiffer F., Eltze J., Weidemann. (1994). The TUM-walking machine. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2. Jamshidi M., Nguyen C., Lumina R., Yuh J. (Eds.). Albuquerque: TSI Press.
- Price D. (1998). Climbing the walls. *IEEE Expert*, 10(2):67-70.
- Raibert M.H., Hodgins J.K. (1993). *Biological neural networks in invertebrate neuroethology and robotics*. Beer R.D., Ritzmann R.E., McKenna T. (Eds.). New York: Academic Press. Chap. 14.
- Sánchez-Cruz, H. (2003). *Medida de similitud para objetos 2D y 3D a través de una energía de transformación óptima*. Centro de Electrónica y Telecomunicaciones, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. pp. 66-72.
- Saranli U., Buehler M., Koditschek D.-E. (2001). RHex: a simple and highly mobile hexapod robot. *International Journal of Robotics Research*, 20(7):616-631.
- Song Y.R., Yan G.-Z., Xu X.-Y. (2005). Research on miniature hexapod bio-robot. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 10(3):226-230.
- Toro H., Chiappa E., Tobar C. (2003). *Biología de los insectos*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. pp. 1-44.
- Vargas E., Gorrostieta E., Pérez A. (2002). *Desarrollo de una pata para un robot hexápodo*. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Instituto Tecnológico de Querétano. pp. 1-9.
- Voth D. (2002). Nature's guide to robot design. *IEEE Intelligent Systems*, 17(6):4-7.
- Xin M., Qing-sheng L., Bao-ling H., et al. (2006). Research on hexapod walking bio-robot locomotion control technology. *Computer Measurement & Control*, 3:348-350.
- Yang M. (2006). Fault-tolerant crab gaits and turning gaits for a hexapod robot. *Robotica*, 24(2):269-270.