

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT HEXÁPODO

F. Eugenio López Guerrero, Jonás Nahum Betancourt Esparza, Humberto Joao Martínez Briones,
Diego Rafael Ancira González, Francisco Ramírez Cruz
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León.
Av. Universidad S/N, Apdo. Postal 9-“F”, CP. 66451, San Nicolás de los Garza, N.L., México.
Teléfono: (0052-81) 8329-4020. Fax: (0052-81) 8332-0904
E-mail: elopez@mail.uanl.mx

RESUMEN

El diseño de robots con características biológicas ha ganado terreno conforme la electrónica y el suministro de energía disminuye su tamaño. Las aplicaciones comprenden desde la factibilidad académica, hasta las que exigen la realización de tareas en terreno irregular o peligroso para el ser humano.

El presente trabajo presenta el diseño y la construcción de un robot hexápodo, durante la cual se consideró la integración del diseño mecánico, electrónico y de programación en un sistema mecatrónico. Al mismo tiempo incluye soluciones con herramientas ingenieriles de última generación tales como fabricación CNC, impresión de partes en prototipos rápidos, diseño geométrico y análisis con programas de CAD, ingeniería de software, comunicación inalámbrica Bluetooth y estructura abierta de programación de movimientos.

Palabras clave: *robot caminante, robot hexápodo, sincronización de movimientos, diseño biológico, prototipos rápidos.*

ABSTRACT

The design of robots with biological characteristics has gained area as the electronics and the supply of energy diminishes their size. The applications include from the academic to those that demand tasks in irregular or dangerous area for the human being. This work presents the design and the construction of a hexapod robot, during which it was considered the integration of the mechanical and electronic design, as well programming in a mechatronic system. At the same time includes solutions with last generation engineering tools as CNC, rapid prototypes, geometric design and analysis with CAD, software engineering, wireless communication and open structure of programming.

Keywords: *walking robot, hexapod robot, Movement synchronization, biologic design, rapid prototyping.*



Fig. 1. Versión 2 del hexápodo que se presenta en este trabajo desarrollado en el departamento de Mecatrónica FIME/UANL.

INTRODUCCIÓN

La locomoción hexápoda de los insectos, igual que la de la mayoría de los artrópodos, les confiere una increíble capacidad de adaptación al medio y de desenvoltura por terrenos abruptos o de difícil acceso. Su efectividad inherente ha hecho posible que esta familia de seres vivos haya sobrevivido hasta la actualidad sin sufrir grandes cambios evolutivos en su sistema motor. De este modo se justifica el intento de emular, con mayor o menor fidelidad, este sistema de locomoción para lograr una buena desenvoltura por terrenos irregulares,

Existe un buen número de proyectos de robots hexápodos debidamente documentados, por lo que enumerarlos aquí es innecesario; algunas páginas de internet de proyectos similares se incluyen en las referencias. Sin embargo, algunas publicaciones sobresalen por ofrecer soluciones a

los diferentes aspectos que la problemática de los robots caminantes implica.

La ventaja principal de los robots dotados de extremidades en lugar de ruedas que permiten transportarse por todo terreno [Bil-XX]. Por lo que puede diseñarse robots con diferentes caminados para diferentes tipos de locomoción, elusión de obstáculos y terrenos no preparados. El campo de los robots móviles requiere estructuras apropiadas de software en tiempo real [Thi-XX]. Adicionalmente, los robots con extremidades son un reto de coordinación de movimiento de las extremidades. [Moh-10] Parte de la base que si se ha programado con algoritmos específicos para las particularidades de cada terreno, debe existir también algoritmos de caminado para la transición entre tipos de terreno.

En [Sch-01] se plantea la ventaja de copiar el movimiento de insectos lentos en máquinas de seis patas. Según sus conclusiones, en estos animales aparenta no haber una coordinación central o del movimiento de las patas. En vez de ello, cada pata parece tener un control individual. [Xia-09] Analiza la cadencia de movimiento de un hexápodo de 3x6 DOF, haciendo énfasis en las características cinemáticas y la estabilidad estática para trayectorias rectilíneas.

[Bow-09] Hace un análisis de variables mecánicas para medir el desempeño de robots caminantes; [Bur-08] construye para un robot hexápodo un control adaptivo retroalimentado con las variables fuerza y posición para resolver el problema de la mejor ruta en un terreno desconocido; [Flo-XX] busca un comportamiento “biológico” utilizando para los algoritmos propiedades de masa, coeficientes de fricción, etc de la estructura del robot. [Cru-XX] hace estudios experimentales en animales al mismo tiempo que simula con estructuras de redes neuronales un control de robot. En [Row-01] se resumen las características de controles de robots caminantes que se adaptan al terreno con dos criterios: control de caminado (1) basado en el conocimiento del terreno por medio de sensores, y (2) basado en el comportamiento, esto es, procedimientos determinísticos de caminado que se adaptan y complementan que dan como resultado una cadencia.

[Qui-98] Trabajo que es la referencia fundamental de muchos. Es la emulación de un cucaracho.

ISBN 968-9173-01-4
SOMIM

Basado en observaciones neurobiológicas y cinemáticas de cucarachos caminando y escalando barreras.

[Joh-95] evalúa propiedades de plataformas de lenguajes computacionales para implementar algoritmos en robots caminantes. Mientras que [Gör-08] utiliza dedos de manos robots para construir un robot caminante.

[Bar-99] Las patas se enlazan con sus controladores utilizando reglas de caminado que aseguran estabilidad y patrones de cadencia a una velocidad determinada. El trabajo de [Don-83] se centra en desarrollar un lenguaje de programación para robots hexápodos. Mientras que [Tor-96] desarrolla un sistema virtual de control para hexápodos.

[Sho-08] Hace un estudio de la cadencia de caminado en todo terreno para proponer algoritmos adaptivos basados en el comportamiento de una extremidad individual.

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue construir un robot hexápodo con capacidad de movimiento autosuficiente en cada pata, reduciendo la cantidad de grados de libertad sin perder la apariencia biológica.

Los objetivos particulares fueron:

- Convertir la información geométrica en formato para fabricar en prototipos rápidos y/o CNC.
- Analizar y simular el mecanismo para dominar el movimiento.
- Implementar un sistema operativo de control de movimiento con estructura programable.

Este trabajo se centra en la integración de los procedimientos de diseño y construcción de las fases que comprende un robot. Parte de la premisa que el diseño mecatrónico es interacción de las ramas de la ingeniería como se muestra en la figura 2.

Aunque el robot esté inspirado en la morfología de insectos y busque cierto grado de verosimilitud biológica, su diseño no pretende emular la biomecánica más allá de las funcionalidades necesarias para el robot. Implementar la locomoción de algún insecto queda como propuesta de continuación de este trabajo.

Derechos Reservados © 2011,

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Para la realización de este trabajo se siguió un método que consta de los cuatro procesos que se muestran en la figura 2.

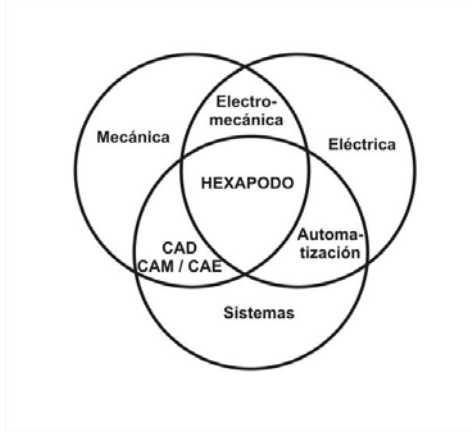


Fig. 2. Integración de las disciplinas de ingeniería que convergen en la creación del robot hexápodo.

El mecanismo de una pata debe cumplir cuando menos con dos movimientos: 1) levantar/bajar y 2) avanzar/retroceder. Por lo tanto el número mínimo de grados de libertad (DOF por sus siglas en inglés) es dos. Es posible diseñar mecanismos con movimiento combinado utilizando un motor, pero el mantener estos separados permite ejecutar movimientos combinados controlados por separado. Por otro lado, utilizar más DOF implicaría más motores y por lo tanto otra relación de peso, costo y desempeño. La figura 3 presenta los movimientos rotacionales de los motores y su relación con el movimiento del punto de contacto de la pata con el suelo.

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 . Para un sistema matricial de coordenadas homogéneas, la ecuación de traslación es:

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

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

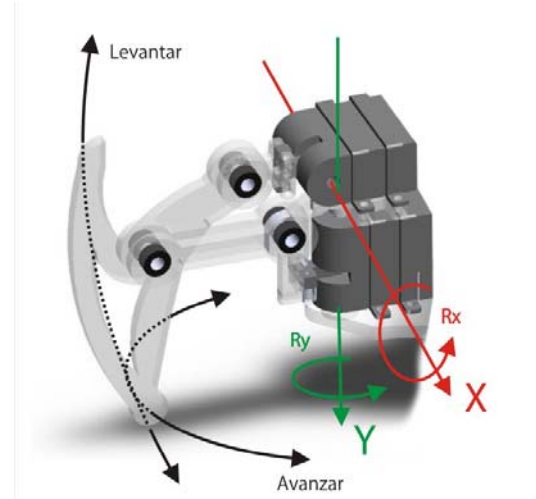


Fig. 3. Grados de libertad (DOF) de cada pata.

Las transformaciones de rotación en coordenadas homogéneas se muestran en las ecuaciones (2) y (3):

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R_y(\phi) = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & 0 & -\sin(\phi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

En donde

- θ es el valor angular de la articulación levantar/bajar
- ϕ el valor angular de avance

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

$$P = T(\Delta x, \Delta y, \Delta z) R_y(\phi) T((\Delta x, \Delta y, \Delta z) R_x(\theta) \quad (4)$$

Con esta ecuación es posible determinar los rangos de operación de los motores de levantar y avance para coordinar el paso de una pata.

Es posible también calcular valores intermedios para rutinas cuya finalidad sea generar una cadencia o simplemente hacer "bailar" al robot.

1) DISEÑO MECÁNICO

El diseño de la pata es un mecanismo de cuatro barras que se muestra en la figura 4. Los motores están fijos al bastidor, mientras que el punto de contacto del suelo de la pata es una extensión del eslabón acoplador.

Análisis del movimiento levantar/bajar

El análisis de este movimiento tiene como objetivo tener control de la altura de la pata. Esto es necesario para casos como terrenos irregulares y rutinas de cadencia.

El rango de trabajo del motor es de 30° cuando la pata está arriba y 110° cuando está abajo. La tabla I muestra todos los rangos de operación del mecanismo.

TABLA I.- Valores angulares de operación de las articulaciones de cada pata.		
	Valor máximo	Valor mínimo
θ (levantar)	110°	30°
ϕ (avanzar)	120°	90°
P (distancia al suelo)	-44mm	-5mm
r (distancia radial)	70.55mm	68.68mm

Se simuló el movimiento del mecanismo para los rangos de la carrera completa según la tabla I. Se muestra que el movimiento de levantar/bajar es aproximadamente vertical. La figura 4 muestra diferentes posiciones a lo largo de la carrera. Los valores de las posiciones mostradas se presentan en la tabla II.

TABLA II.- Mediciones de posiciones de carrera para el movimiento de levantar.		
θ (levantar)	Distancia radial (mm)	P (altura mm)
30°	68.68	-5
60°	69.57	-19.62
90°	69.01	-35.98
100°	69.20	-40.61
110°	70.55	-44.18

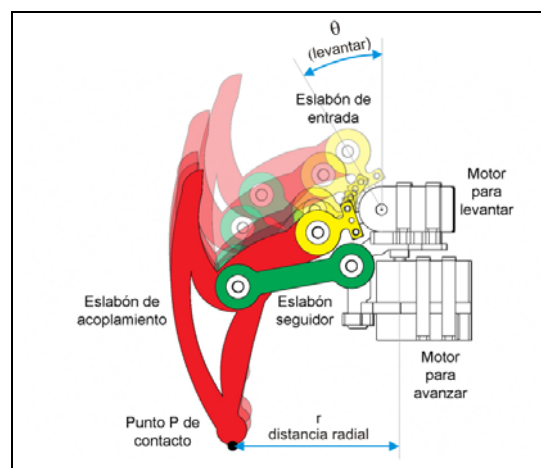


Fig. 4. Movimiento de bajar/levantar para las cinco posiciones de la tabla II.

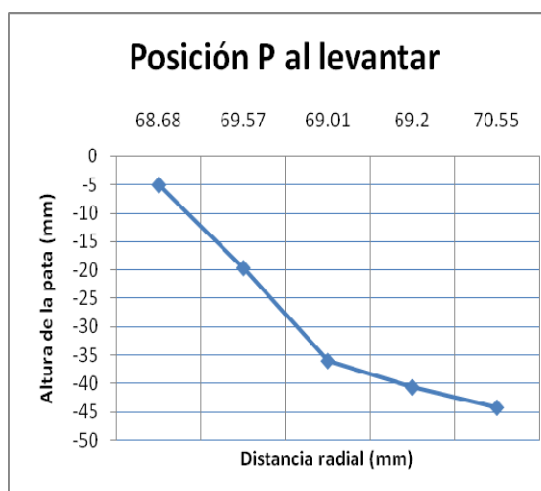


Fig. 5. Posición del punto de contacto con el suelo al bajar/levantar para el caso de la figura 4.

La gráfica 6 muestra la posición del punto P de contacto al suelo de la pata con respecto al tiempo. La escala de tiempo se expresa de 0 a 1.

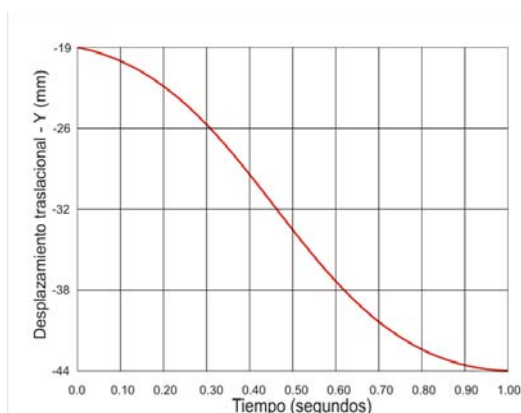


Fig. 6. Posición del punto de contacto al suelo en un ciclo de movimiento.

La estructura del robot con las seis patas, la electrónica de control y las baterías de alimentación fueron modeladas utilizando un software de CAD. El diagrama de partes explotado se muestra en la figura 7.

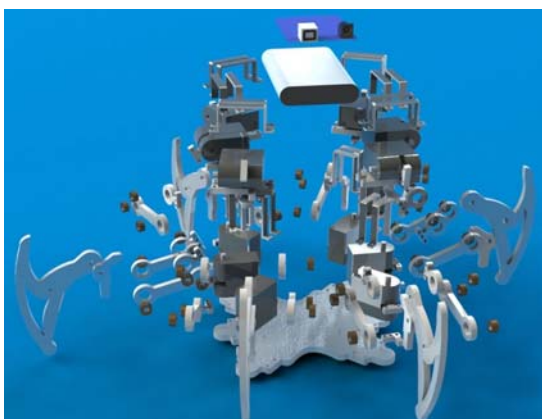


Fig. 7. Estructura de partes explotada.

Fabricación 3D en prototipo rápido de la tapa

Por razones estéticas se diseñó y construyó una tapa para la electrónica de control, simulando el cuerpo del robot. Se añadieron dos diodos LED emulando ojos. La fabricación se hizo en prototipo rápido con una impresora 3D ZCorp. Ver figura 8.

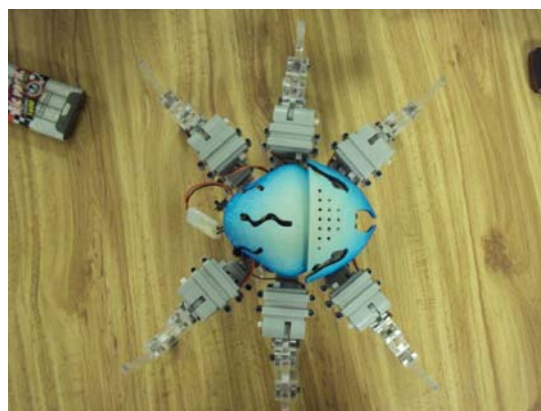


Fig. 8. Carcasa fabricada en prototipo rápido.

2) CONTROL ELECTRÓNICO

Un computador personal se encarga de administrar información entre el robot y el usuario. El control del robot es un módulo ARDUINO UNO que supervisa la información proveniente de la computadora y gobierna el movimiento de las patas del robot. Ver figura 9.

El ARDUINO UNO cuenta con comunicación USB para la programación del control y Bluetooth para la operación del robot.

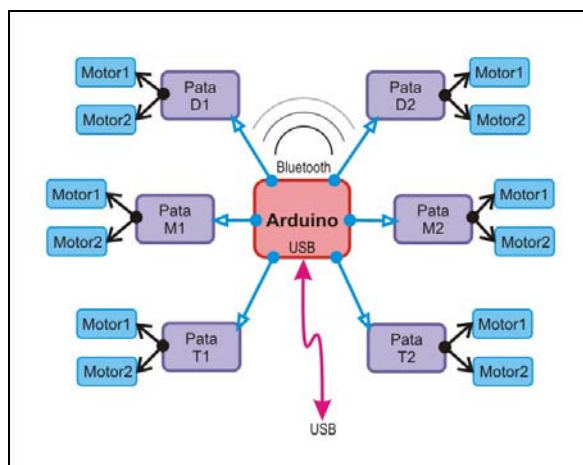


Fig. 9. Diagrama de interacción de componentes. El procesador central recibe órdenes complejas de movimiento y sincroniza las patas.

Esta arquitectura electrónica permite que el robot pueda moverse 1) en modo manual, 2) utilizando algoritmos pre-grabados en la memoria del control y 3) siendo controlado en tiempo real por medio de rutinas que se ejecuten en la computadora.

Adicionalmente, permite en un futuro retroalimentar el medio ambiente con sensores y enviar esta información a algoritmos complejos de caminado controlado por computadora.

La figura 10 muestra el módulo ARDUINO UNO así como la asignación de salidas para la conexión de los motores según se describe en la tabla II.

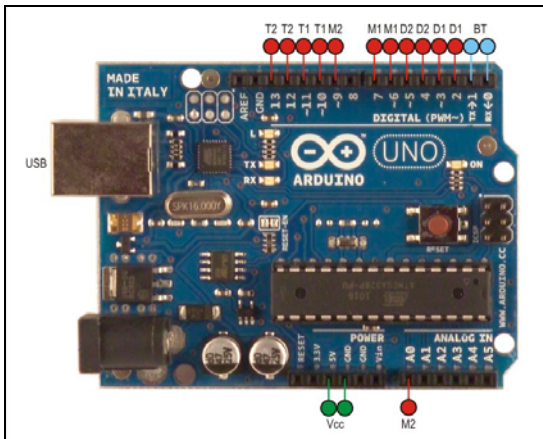


Fig. 10. Tarjeta "ARDUINO UNO" utilizada para el control y sincronización de los motores y la comunicación con la computadora.

TABLA II.- Asignación de las conexiones en la tarjeta ARDUINO para los motores.		
Pata	Motor de avanzar	Motor de levantar
D1	2	3
D2	4	5
M1	6	7
M2	A0	9
T1	10	11
T2	12	13

Comunicación Bluetooth

El módulo ARDUINO que controla las extremidades se comunica para procesar las órdenes por medio de un módulo Bluetooth Technology v2.0 de Roving Networks (ver figura 11). Este módulo, dotado de un UART con tasa de transferencia inalámbrica de 721kbps a 2.0Mbps, está diseñado para reemplazar la comunicación serie (nivel TTL, sin convertidor RS232). El ARDUINO solamente maneja los caracteres seriales transmitidos y recibidos. Esta comunicación es utilizada para que el robot se mueva en función de algoritmos que se ejecuten en la computadora en tiempo real.

ISBN 968-9173-01-4
SOMIM

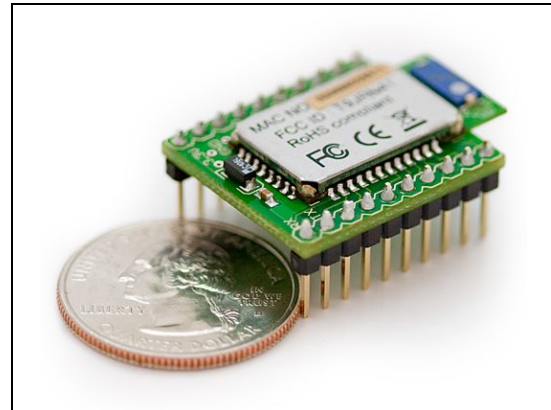


Fig. 11. Módulo Bluetooth para la comunicación de movimiento entre el robot y la computadora.

3) ESTRUCTURA DE LA PROGRAMACIÓN

Las funciones de asignación de las terminales del ARDUINO conectadas a los motores se inicializan utilizando la llamada:

```
servoAvanzeD1.attach(2);
```

La cual asigna la función *servoAvanzeD1* a la terminal 2 (ver figura 10).

Los valores angulares son enviados al control del motor por medio de la función:

```
servoAvanzeD1.write(90);
```

que son enviados secuencialmente a los motores del robot. La velocidad de respuesta natural del sistema mecánico al comando de movimiento comparada con la velocidad de las señales electrónicas del procesador hace que el movimiento en las patas sea prácticamente simultáneo. Para compensar esta diferencia de velocidades es necesario que el algoritmo haga paradas de retraso:

```
delay(10);
```

Derechos Reservados © 2011,

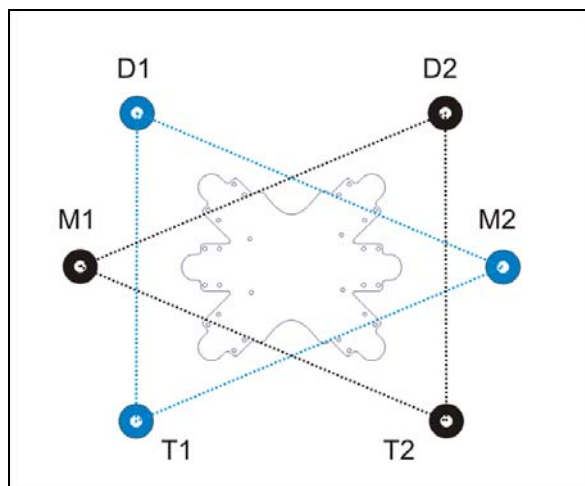


Fig. 12. Tripletas de patas como apoyo. Los círculos representan el punto de apoyo de cada pata.

El algoritmo de caminado utiliza un triplete de apoyo para garantizar estabilidad y mover el resto de las patas para dar un paso. En la figura 12 se muestran los dos tripletas D1-M2-T1 y D2-M1-T2

Una función de cadencia (figura 13) puede ser programada simplemente con un ciclo. Finalmente, se programó una interfaz para enviar desde la computadora comandos de ejecución de funciones por medio de la comunicación Bluetooth. Ver figura 14.

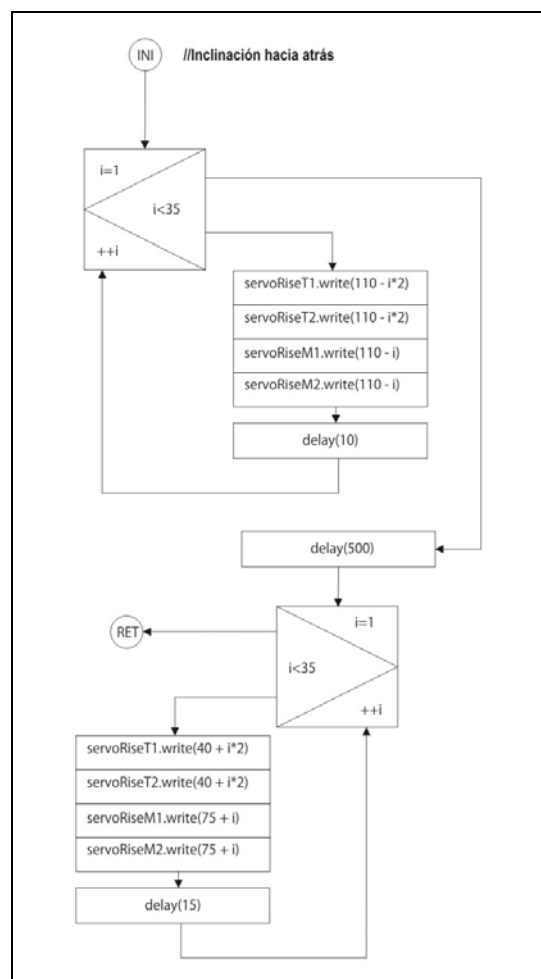


Fig. 13. Diagrama de interacción de componentes. La tarjeta ARDUINO recibe órdenes complejas de movimiento y sincroniza las patas.



Fig. 14. Interfaz para enviar comandos de ejecución de caminado por medio de la computadora.

REFERENCIAS

- [Sch-01] Josef Schmitz, Jeffrey Dean, Thomas Kindermann, Michael Schumm, and Holk Cruse. "A biologically inspired controller for hexapod walking: simple solutions by exploiting physical properties". *Biol. Bull.* 200: 195–200. April 2001.
- [Xia-09] Xiaohu Lv, Yongxin Liu. "A bionic gait programming algorithm for hexapod robot". *ICIS 2009*, November 24-26, 2009 Seoul, Korea, 2009 ACM 978-1-60558-710-3/09/11.
- [Moh-10] Mohiuddin Ahmed, Raisuddin Khan, Masum Billah and Soheli Farhana. "A novel navigation algorithm for hexagonal hexapod robot". *American J. of Engineering and Applied Sciences* 3 (2): 320-327, 2010. ISSN 1941-7020, Science Publications.
- [Row-01] Rowel O. Atienza, Marcelo H. Ang Jr. "A flexible control architecture for mobile robots: an application for a walking robot", *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 30: 29–48, 2001. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- [Bur-08] Ervin Burkus, Peter Odry, "Autonomous hexapod walker robot "szabad(ka)""", *Acta Polytechnica Hungarica* Vol. 5, No. 1, 2008, pp. 69-85
- [Thi-XX] Bernard Thirion, Laurent Thiry. "Concurrent Programming for the Control of Hexapod Walking". *ESSAIM, Ecole Supérieure des Sciences Appliquées pour l'Ingénieur-Mulhouse* 12 rue des Frères Lumière. 68093 Mulhouse Cedex, France.
- [Qui-98] Roger D. Quinn & Roy E. Ritzmann. "Construction of a Hexapod Robot with Cockroach Kinematics Benefits both Robotics and Biology". *Connection Science*, Vol. 10, No. 3&4, 1998, p.239-254.
- [Cru-XX] Holk Cruse, Volker Dürr, Josef Schmitz and Axel Schneider. "Control of Hexapod Walking in Biological Systems" Faculty of Biology, University of Bielefeld, 33501 Bielefeld, Germany.
- [Flo-XX] J. P. Flores Fernandes, J. C. Pimenta Claro, Fernando Ribeiro. "Design Of A Hexapod Robotic System". School of Engineering, University of Minho Campus de Azurém, Guimarães Portugal.
- [Joh-95] Johu K. Estell, Thomas A. Owen. "Experiencing The Codesign Process: Microcomputer Systems Ii Laboratory". *SIGCSE '95* 3/95 Nashville, TN USA, 1995 ACM O-89791-693-X195JO003, p.34-38.
- [Gör-08] M. Görner, T. Wimböck, A. Baumann, M. Fuchs, T. Bahls, M. Grebenstein, Ch. Borst, J. Butterfass and G. Hirzinger. "The DLR-Crawler: A Testbed for Actively Compliant Hexapod Walking Based on the Fingers of DLR-Hand II". *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Acropolis Convention Center Nice, France, Sept, 22-26, 2008.
- [Bow-09] Alan Bowling and Shih-Chien Teng. "Performance Measures of Agility for Mobile Robots". *PERMIS'09* September 21-23, 2009, Gaithersburg, Maryland, USA. 2009 ACM 978-1-60558-747-9/09/09.
- [Bar-99] David P. Barnes and Javan B. Wardle. "Robust gait generation for hexapodal robot locomotion". *Autonomous Agents '99* Seattle WA USA. ACM 1999 1-58113-066-X/99/05.
- [Don-83] Marc D. Donner. "The Design of OWL a language for walking". 1983 ACM 0-89791-108-3/83/006/0158.
- [Tor-96] Ann L. Torres. "Virtual Model Control of a Hexapod Walking Robot". Bachelor of Science in Mechanical Engineering Thesis. 1996, Massachusetts Institute of Technology.
- [Bil-XX] Md. Masum Billah, Mohiuddin Ahmed, and Soheli Farhana. "Walking Hexapod Robot in Disaster Recovery: Developing Algorithm for Terrain Negotiation and Navigation". *World Academy of Science, Engineering and Technology* 42 p. 328-333. 2008.
- [Sho-08] Mark H. Showalter. "Work Space Analysis and Walking Algorithm Development for A Radially Symmetric Hexapod Robot". Master of Science in Mechanical Engineering Thesis. 2008, Virginia Polytechnic Institute and State University.

DIRECCIONES DE INTERNET

- Micromagic Systems
www.micromagicsystems.com
- Lynxmotion
www.lynxmotion.com
- Asterisk
www-arailab.sys.es.osaka-u.ac.jp
- Projekt Marvin
- AMOS-WD06
www.chaos.gwdg.de
- Mike Smyth's Hexapod
home.ctlnet.com/~robotguy67/hexapod
- Bill-ant
biorobots.cwru.edu/projects/billant
- Lauron
www-iri.upc.es
www.mca2.org
- Melanie III
mundobot.com/projects/melanie/spmelanie

AUTORES

López Guerrero, Francisco Eugenio

Ingeniero Mecánico Electricista e Ingeniero en Control y Computación de la UANL, Maestro en Ciencias de la Administración con especialidad en Sistemas por la misma Universidad, durante estos estudios participó en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania en donde desarrolló su tesis de maestría. Doctor en Ingeniería de materiales en la Universidad Autónoma de Nuevo León trabajando en conjunto con el Departamento de Materiales y Automatización de la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la FIME. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”, así como también de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica SOMIM.
elopez@mail.uanl.mx
<http://gama.fime.uanl.mx/elopez/>

Humberto Joao Martínez Briones

Estudiante del 8° semestre de la carrera de Ingeniero en Mecatrónica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL. Es también técnico en Electricidad y Electrónica Industrial con una extensión del curso en Controladores Lógicos Programables. Ha participado en congresos de ingeniería. Entre sus intereses destacan los idiomas: habla fluidamente el español y el inglés; actualmente estudia el

alemán. Tiene aptitudes en el diseño CAD/CAM así como el funcionamiento y práctica de la neumática, hidráulica e instalaciones eléctricas.
joao_mtz@hotmail.com

Jonás Nahum Betancourt Esparza

Estudiante del 8° semestre de la carrera de Ingeniero en Mecatrónica con acentuación en el área de Biodispositivos en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL. Habla español, inglés y francés. Entre sus intereses personales se encuentra el diseño de partes, la electrónica, la programación orientada a objetos, la electrónica de potencia, así como la ingeniería ambiental.
jns_be14@hotmail.com

Francisco Ramírez Cruz, Prof.Dr.

Ingeniero Mecánico Electricista, Maestro en Ciencias de la Mecatrónica en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Dirigió el Departamento de Somatoprótesis de la Facultad de Medicina de la UANL. Doctor en Ingeniería de Materiales en la Universidad Autónoma de Nuevo León trabajando en conjunto con el Departamento de Materiales y Automatización de la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”.

Diego Rafael Ancira González

Estudiante del 8° semestre de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica con acentuación en Máquinas Inteligentes en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL. Domina el inglés y ha tomado diversos cursos de alemán. Tiene una carrera técnica en Mecatrónica, y realizó sus prácticas profesionales en Altos Hornos de México, en donde daba mantenimiento preventivo a espectrómetros y máquinas de rayos X. Entre sus intereses personales está el diseño mecánico y el control.