

Robot hexápodo bioinspirado

Alexander Pérez Ruiz

En este artículo se presentan los resultados del diseño y construcción de un robot móvil autónomo caminador de seis extremidades y ocho grados de libertad (DOF*), bioinspirado en los artrópodos. Durante todo el proceso de diseño se mantuvo como objetivo principal el desarrollo de un prototipo escalable y de fácil producción por los métodos de fabricación convencionales que se utilizan en el país.

* *Degree Of Freedom.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han venido desarrollando a lo largo y ancho del planeta soluciones robóticas móviles con diferentes finalidades, como rastreadores, luchadores de sumo o jugadores de fútbol, y sistemas totalmente autónomos de transporte de materiales, entre otros.

Entre los mecanismos utilizados para la movilización de estos sistemas sobre terreno firme se encuentran las ruedas, las orugas y, finalmente, las patas.

Por su diseño y control, las patas son el mecanismo más complejo, pero brindan una ventaja potencial en aquellas zonas donde los vehículos con ruedas no se pueden movilizar fácilmente, como por ejemplo sobre terrenos irregulares.

ANTECEDENTES

La investigación sobre extremidades articuladas como mecanismo de movilización para robots data de finales de la década de los años setenta, cuando se publican resultados sobre el análisis de la locomoción en insectos (H. Cruse, 1976), que han sido la base para establecer las propuestas de locomoción más sencillas pero a su vez las más efectivas.

Consortios de universidades estadounidenses (Stanford, U.C. Berkeley, Harvard y Johns Hopkins) han desarrollado durante la última década diseños de patas para microbots (robots móviles de tamaños reducidos) e insectoides (robots que imitan la fisiología de los insectos) basados en estudios realizados sobre la *Blaberus discoidalis*, o cucaracha. Con estos estudios

se hacen aportes para la selección de materiales que ofrezcan características similares a los de la naturaleza (Vogel, 1995), como músculos o estructura esquelética, y modernos procesos de fabricación y de desarrollo rápido de prototipos como en *Shape Deposition Manufacturing* (SDM), o fabricación por conformado de capas utilizado en su construcción (S. Bailey *et al.*, 1999, X. Xu *et al.*, 2000).

De dicho trabajo se obtuvo la *Sprawlita* (figura 1), un insectoide parecido a la cucaracha de aproximadamente 10 cm de largo, 4 cm de ancho y 5 cm de alto, que desarrolla velocidades de hasta tres veces el tamaño de su cuerpo por segundo (J. Clark *et al.*, 2001).

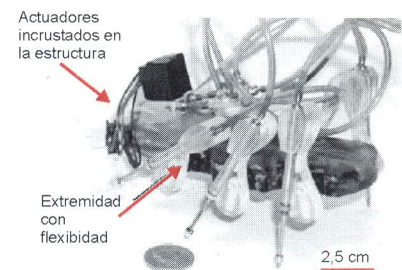


Figura 1. *Sprawlita*, hexápodo dinámicamente estable, resultado de las investigaciones en la locomoción de la cucaracha.

Se han desarrollado hexápodos menos complejos de naturaleza didáctica, producidos como “kit educativo” o como pasatiempo de miles de aficionados a la electrónica y la robótica alrededor del mundo.

En su construcción se utilizan diversas topologías que pueden variar el

Ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Colombia y magíster en ingeniería electrónica y de computadores de la Universidad de los Andes. Docente de tiempo completo de la Escuela Colombiana de Ingeniería aperez@escuelaing.edu.co.

número de grados de libertad con los que cuenta el robot, entre tres (figura 2) y dieciocho.

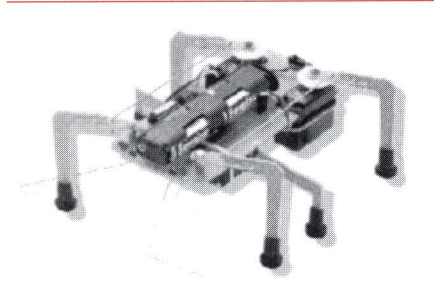


Figura 2. StampBug, de Milford Instrument.

Un aspecto importante en la evolución de los robots caminadores ha sido el desarrollo de algoritmos de marcha y estabilización en terrenos no estructurados (con características de campo abierto; con texturas como arena, suelo, etc.), como el mostrado en la figura 3 (R. Pfeiffer), así como de evasión de obstáculos y planeación de trayectorias.

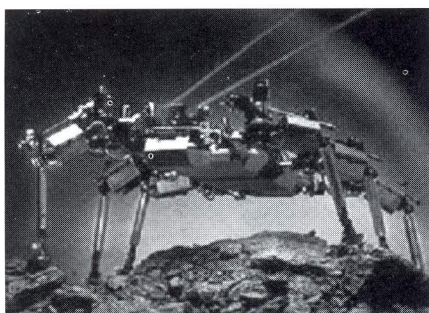


Figura 3. Tarry II desarrollado por el profesor Rolf Pfeiffer.

OBJETIVO

Diseñar y construir un robot caminador hexápodo, sencillo y económico, con capacidad de movilizarse en terrenos no estructurados, manteniendo su línea de marcha recta y evadiendo obstáculos, sin la generación de trayec-

torias particulares. Como características principales deberá diseñarse para su producción en serie y tener la capacidad de transportar una carga muerta, como por ejemplo el peso de los sistemas de detección de cargas explosivas.

SISTEMA PROPUESTO

Como acercamiento al problema de la locomoción a pie, se han estudiado pequeños animales tales como los insectos y los artrópodos. El número de extremidades de estos animales se encuentra entre cuatro y ocho, pero seis es el más común porque ofrece más posibilidades de conseguir la estabilidad estática y dinámica, lo que ayudaría a reducir la complejidad del control de marcha si se usara ese número en la construcción del robot.

De la dinámica de marcha de algunos artrópodos, en especial de la *Blaberus discoidalis* o cucaracha, se han obtenido modelos del patrón de movimiento de especial interés por su velocidad, la posibilidad de franquear, con relativa facilidad, obstáculos de hasta tres veces la altura de su centro de masa y la estabilidad de su marcha en terrenos no estructurados. Diferentes investigaciones se han concentrado en la gran estabilidad estática que brinda su postura, dejando al descubierto la importancia que tienen la característica viscoelástica de sus extremidades, la pequeña inclinación de su porción torácico-abdominal y la ubicación de su centro de masa (Full *et al.*, 1995).

A partir de estos estudios se desprenden los siguientes principios de diseño para obtener rápidos y estables robots hexápodos caminadores:

- Postura autoestabilizante.
- Funciones de empuje y estabilización de las extremidades.
- Estructura pasiva viscoelástica.
- Control en lazo abierto temporalizado.

En su posición estática y durante la marcha, el centro de masa del robot se debe encontrar siempre dentro del polígono que formarán los puntos de apoyo de por lo menos tres de sus extremidades. Ésta se convierte en una condición suficiente, que garantiza la estabilidad del robot.

El sistema tendrá sensores para medir el ángulo de inclinación del cuerpo con respecto a la horizontal en los ejes longitudinal y transversal del cuerpo, y otros que le permitan inspeccionar el espacio adyacente para indagar por la existencia de posibles obstáculos.

Para generar el movimiento de las articulaciones se utilizarán pequeños servomotores eléctricos, como los usados en aeromodelismo, y se proveerá energía eléctrica por medio de una batería que dará autonomía al robot.

Diseño mecánico

Para proponer el diseño hay que tomar en cuenta los siguientes aspectos, en orden de importancia:

- Dar la posibilidad de marcha en trayectos rectos y curvos.
- Dotar de dos grados de libertad cada extremidad.
- Sencillez en la fabricación.
- Costo reducido tanto en materiales como en procesos de fabricación.
- Estructura de poco peso.

Con estos lineamientos definidos se decidió fabricar el robot en lámina de acero CR calibres 20 y 22 para muchas de las partes móviles y algunas partes en aluminio, sobre todo las destinadas a mantener el montaje de los motores.

Dado que se quería tener la posibilidad de la producción en serie de un gran número de robots y como el material elegido es lámina metálica, se pueden realizar todos los procesos de corte y doblado requeridos para su fabricación, por la técnica de conformación por troquelado, proceso con el

cual el tiempo y el costo de producción se reducirían al mínimo. Para la fabricación del prototipo tuvieron que hacer unas modificaciones en el diseño, ya que localmente no se encuentran dobladoras manuales ni de control numérico que puedan realizar estos dobleces tan pequeños y mucho menos en láminas tan delgadas.

La máquina caminante está compuesta por 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. El mecanismo de movimiento debe cumplir con dos requerimientos: el primero es que el extremo deberá elevarse una cantidad suficiente como para franquear pequeños obstáculos, y el segundo es que debe proporcionar los dos grados de libertad de cada pata: uno para la elevación del suelo y otro para generar el arrastre horizontal.

El sistema más adecuado para generar el movimiento de elevación de las extremidades es un mecanismo de seis barras, que ofrece la posibilidad de transmitir la potencia generada por los motores usando una palanca que amplifica su torque. El sistema final se muestra a continuación (figura 4).

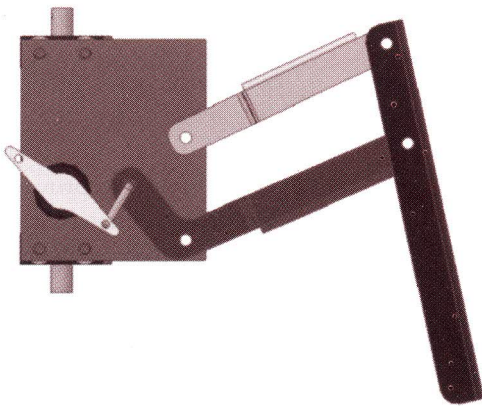


Figura 4. Mecanismo de seis barras de elevación de la extremidad.

Una vez obtenido el mecanismo de la extremidad izquierda, sólo basta hacer una copia totalmente simétrica para la derecha y realizar el diseño del chasis que unirá las seis extremidades. Éste es importante al analizar el patrón de marcha que va a tener el hexápodo, tanto porque define la distancia entre patas para evitar su colisión y la separación de “hombros” que debe tener para garantizar la estabilidad, como por la ubicación de los motores y todos los demás circuitos y componentes electrónicos,

Al observar el comportamiento particular de los artrópodos e insectos al caminar, se pueden distinguir claramente

dos patrones de marcha: una trípede, en la cual se apoyan tres patas a la vez, mientras las otras tres están avanzando en el aire hacia el siguiente punto de apoyo, y una configuración de cuadrúpeda, en la que se consigue una mayor velocidad pero la estabilidad en el avance se ve seriamente comprometida (figura 5) (R. Pfeiffer).

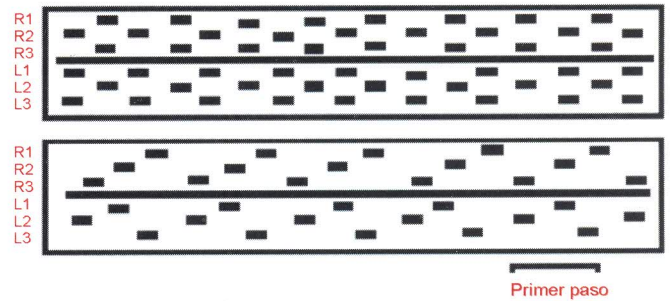


Figura 5. Patrones de marcha de los hexápodos que se encuentran en la naturaleza. El eje vertical muestra las patas derechas (R) e izquierdas (L) y el eje horizontal muestra el tiempo. Se interpreta que las marcas señalan las extremidades que están en contacto con el suelo en un mismo lapso de tiempo. Se aprecian el patrón trípede arriba y el cuadrúpede abajo.

El patrón más común es el trípede y es más fácil de generar que el cuadrúpede, razón por la cual se escoge como modelo de marcha del robot. Los dos conjuntos de patas que se apoyarán para conformar el trípede en cada instante de tiempo se pueden apreciar claramente en la figura 6.

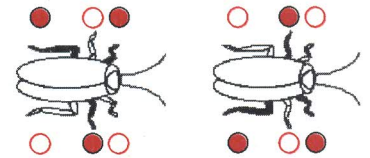


Figura 6. Patrón de marcha escogido para el robot hexápodo.

El diseño total del robot se muestra en la figura 7, donde se pueden apreciar los dos grados de libertad por cada extremidad, pero se escoge la configuración en tren (derecho e izquierdo) para generar el movimiento de avance con un solo motor por cada uno de ellos y así reducir la complejidad de la marcha.

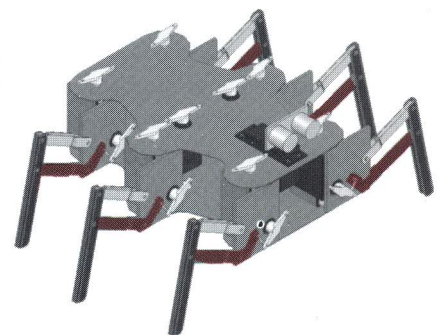


Figura 7. Diseño final del hexápodo.

Por medio del programa de diseño se realizaron los cálculos tanto de peso de la estructura, a través del volumen y la densidad de cada una de las piezas que la conforman, que es de 1,48 kg, como de la ubicación del centro de masa (figura 8).

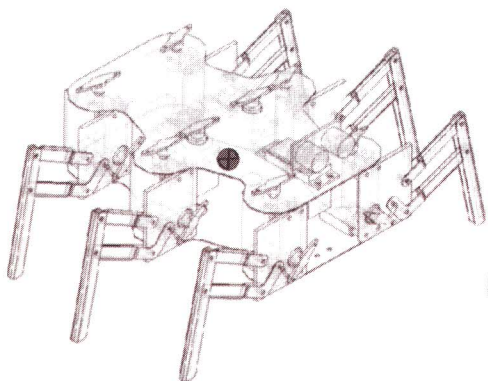


Figura 8. Ubicación del centro de masa de la estructura, sin los circuitos electrónicos y sin batería.

Teniendo el peso de la estructura y calculando el peso aproximado de los circuitos electrónicos y la batería en 0,3 kg, se pueden hacer los cálculos de los torques necesarios para conseguir el movimiento de elevación de las extremidades, el soporte de la carga y el avance del móvil. En el momento más crítico de la marcha, todo el peso del robot va a estar soportado por tres puntos de apoyo, es decir, que tendrá que ser soportado por el accionar de tres extremidades y sus correspondientes motores. De la geometría particular del robot, y dado que la mayor parte del tiempo el centro de masa se encuentra simétricamente distante de los puntos de apoyo, se tiene una distribución uniforme del peso.

En este punto se puede apreciar la ventaja que ofrece el mecanismo de seis barras en el movimiento y la transmisión de la fuerza generada por el motor, y que en el presente caso redu-

ce al 80% el torque necesario para sostener el peso (figura 9).

Se deben hacer los cálculos de la fuerza de arrastre requerida para mover el robot y que también se transmite al piso a través del punto de apoyo (figura 10).

Se desarrolló un modelo de *software* para la simulación dinámica con el fin de analizar esfuerzos, deformaciones e interferencias, soportados en la metodología de los elementos finitos.

Este modelo se validó para los mecanismos de las extremidades y para la estructura portante de forma independiente. Además, a partir de los resultados obtenidos, se realizaron los rediseños correspondientes para conseguir una estructura liviana, funcional y mecánicamente adecuada.

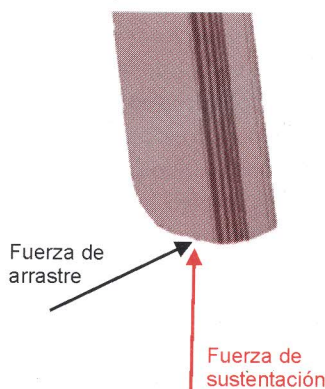


Figura 10. Detalle de las fuerzas ejercidas en el punto de apoyo de las extremidades con el piso.

En la figura 11 se pueden observar los esfuerzos inducidos en la extremidad por las fuerzas de soporte y arrastre.

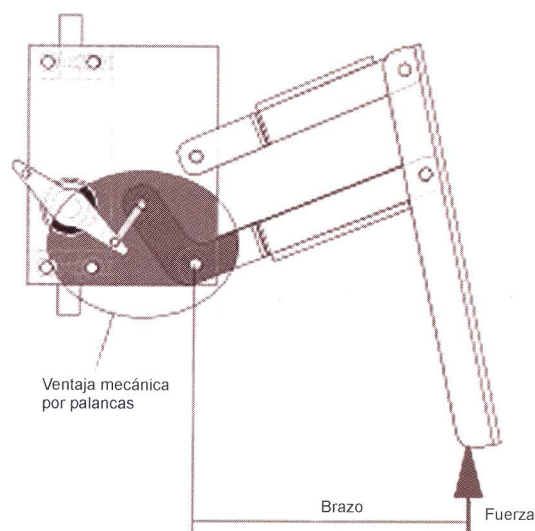


Figura 9. Detalle de la ventaja mecánica dada por el mecanismo de seis barras.

Diseño electrónico

El diseño electrónico se basó en una estructura de dos microcontroladores PIC en configuración maestro-esclavo, con claras funciones para cada miembro.

El maestro se encarga de las tareas de planeación de los movimientos de avance del robot, junto con la lectura de los sensores que proveen la información de la inclinación y la distancia al obstáculo próximo en línea recta, en la dirección de movimiento del móvil.

El esclavo se encarga de la generación de las señales que controlan los servomotores y recibe la información proveniente del maestro acerca de la posición deseada para cada uno de los ocho motores que maneja.

Los sensores proveen al sistema móvil de la información necesaria para navegar libremente, consistente en los ángulos de inclinación del chasis en sus ejes longitudinal y transversal y en la distancia al obstáculo más cercano.

Los ángulos de inclinación se adquieren de manera indirecta por un acelerómetro ADXL202 de Analog Devices®, capaz de medir aceleraciones de hasta 2 g en dos ejes, que lo pone en capacidad de servir de

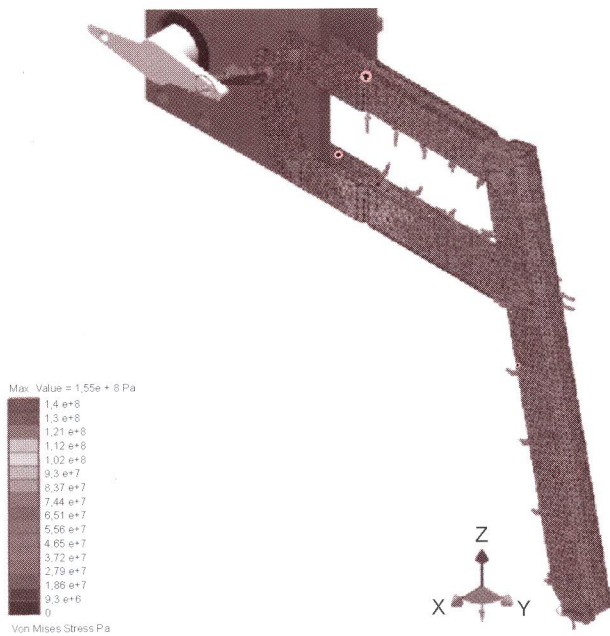


Figura 11. Resultados de los cálculos de esfuerzos en el mecanismo de elevación.

inclinómetro si la aceleración que se mide es la de la gravedad. La salida de este sensor es de tipo PWM, proporcional a la fracción de gravedad correspondiente a cada uno de los ejes, que hace sencilla su utilización con microcontroladores (figura 12).

El sensor de ultrasonido utilizado es un SRF04 de Devantech®, montado sobre un servomotor, que le da la posibilidad de explorar el espacio contiguo alrededor del móvil, con lo que se puede determinar si el espacio en la dirección de movimiento se encuentra libre o si, por el contrario, hay obstáculos.

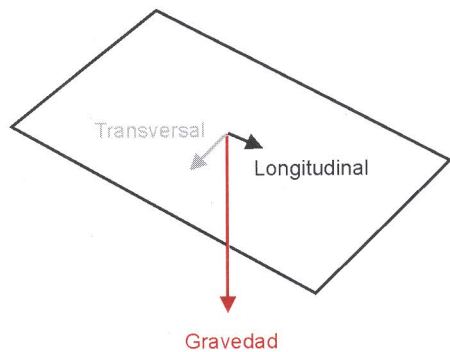


Figura 12. Descomposición de la gravedad en los dos ejes de interés para el acelerómetro.

Este montaje funciona a manera de “radar” aprovechando el cono de dispersión particular del sensor, que en este caso es de aproximadamente 20 grados, con lo que no es necesario utilizar más sensores en diversas posiciones o direcciones (figura 13).

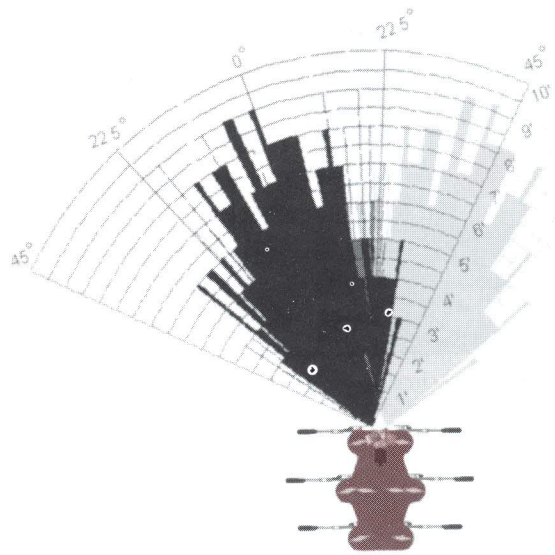


Figura 13. Ubicación del sensor de ultrasonido y forma de inspección del espacio.

Para mantener la modularidad y facilitar el montaje de los circuitos en el interior del chasis, se diseñaron circuitos impresos para cada uno de los microcontroladores y una adicional para las tareas de regulación de la energía y la recarga de la batería.

En la figura 14 se observa el resultado obtenido para el circuito maestro y en la figura 15 se ve la correspondiente al circuito esclavo.

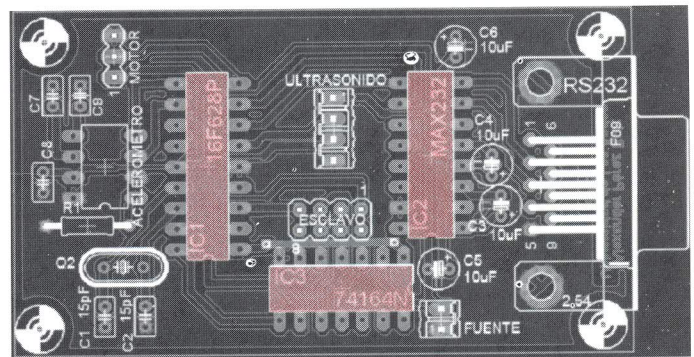


Figura 14. Circuito impreso para el microcontrolador maestro con la entrada de los sensores, la comunicación con el esclavo y la comunicación RS232.

Diseño del software

El esquema básico de control propuesto para el robot consiste en un sistema jerarquizado maestro-esclavo, donde el

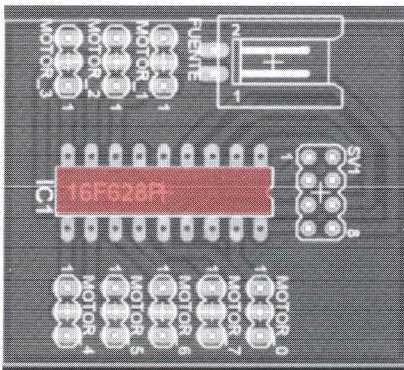


Figura 15. Diseño final del circuito esclavo con las conexiones para los motores y la comunicación con el maestro.

maestro efectúa las tareas de estabilización, avance y monitoreo de los sensores, y el esclavo está encargado de controlar los motores de las extremidades (figura 16).

El sistema de control de la navegación como tal está formada por dos bloques: uno correspondiente al control de la dirección y otro encargado del control de la inclinación. Estos bloques

van a determinar tanto la magnitud de la extensión de cada una de las extremidades como la cantidad de desplazamiento horizontal que va a tener cada sección. El bloque que genera la secuencia de movimientos coordinará la forma como cada uno de los movimientos individuales hace su aporte para conseguir el movimiento uniforme y estable del robot móvil.

ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE CONTROL

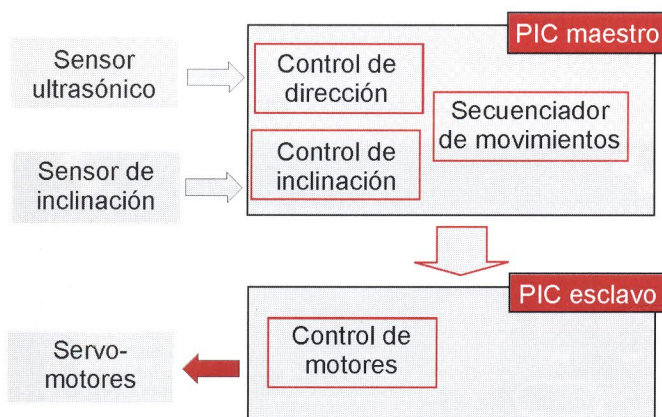


Figura 16. Esquema de control propuesto para el robot.

El controlador propuesto tanto para la dirección como para la inclinación es difuso, tipo Sugeno. El bloque de dirección recibe como entrada las distancias del obstáculo más cercano en dirección de las diagonales de avance del robot y obtiene como salida la medida de arrastre necesario en los dos trenes de patas. La finalidad última de este

sistema es evadir o franquear los obstáculos, dependiendo de su tamaño.

El controlador de inclinación, cuya función es nivelar el robot en caso de encontrar una superficie inclinada o un obstáculo que pueda franquear en su trayecto, recibe como entradas las señales provenientes del acelerómetro y obtiene la altura nominal de cada una de las seis patas, alrededor de la cual se generan los movimientos de elevación, avance y arrastre que consiguen la estabilización y el movimiento.

Al plantear el controlador de este modo se obtiene una independencia entre los movimientos horizontales, correspondientes al avance, y los verticales, que tratarán de mantener el chasis del robot perpendicular al vector de gravedad, sin importar lo accidentado del terreno.

El universo de discurso de las entradas de los sistemas de inferencia difusos FIS (*Fuzzy Inference System*) está dividido en tres conjuntos definidos por funciones de membresía trapezoidales, en tanto que el de las salidas está compuesto por cinco conjuntos de tipo *singleton*, que pueden configurarse desde un computador con un sencillo protocolo de comunicación serial.

El FIS con salidas de tipo *singleton* es un sistema difuso tipo Sugeno de orden cero, que puede verse como un caso particular del sistema de inferencia Mamdani con salidas predefuzzificadas (J. Jang *et al.*). La ventaja del modelo Sugeno sobre el Mamdani es que el proceso de obtener una salida no difusa (*crisp*) es menos complejo y resulta más conveniente para implementarlo en un microcontrolador.

Esta configuración se escoge para simplificar los procesos inherentes de fuzzificación y defuzzificación, y aunque las reglas de cada uno de los controladores son independientes, no son susceptibles de modificación sin entrar a reprogramar el microcontrolador.

En la figura 17 se muestran las características más importantes del sistema de control de dirección.

Para lograr la robustez del controlador es necesario describir su comportamiento por medio de reglas generales simples, de tal modo que la interacción de las reglas y los conjuntos difusos ofrezca la generalización del problema y no brinde una respuesta desafinada cuando se presente una situación para la cual no se ha previsto una regla particular; por tal razón, el controlador se debe implementar con reglas del tipo:

- Si Izquierdo (Derecho) es Lejos, AvanceI (AvanceD) es GAdelante.
- Si Izquierdo es MCerca y Derecho es MCerca, AvanceI es GAtrás y AvanceD es GAtrás.

Una de las desventajas que tiene el modelo Sugeno es que la transición de la salida en dos instantes de tiempo consecutivos puede producirse por saltos bruscos. Si la plan-

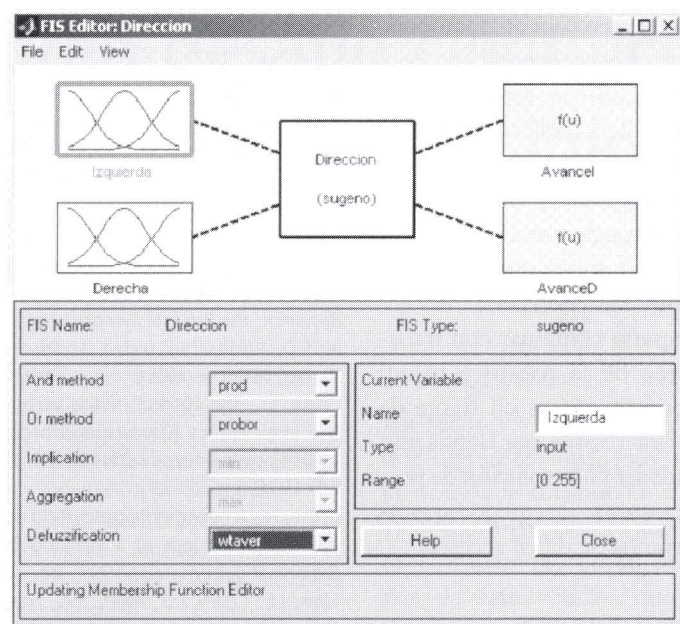


Figura 17. Características principales del FIS del controlador de dirección. Consta de dos entradas con tres conjuntos difusos cada una, dos salidas con cinco *singletons* y cinco reglas.

ta que hay que controlar fuera continua este efecto podría llegar a ser muy perjudicial para los actuadores, pero en el presente caso la propia dinámica de la marcha en un proceso por etapas, lo cual minimiza este efecto.

Navegación

El patrón de navegación del robot consiste en caminar de frente en línea recta, siempre que no encuentre obstáculos, y al momento de hacerlo puede tratar de superarlos (franquearlos) o evadirlos, dependiendo del tamaño particular de éste.

Por medio de una pequeña inclinación del sensor ultrasónico hacia el suelo (figura 18), es posible medir la distancia mínima que debe existir entre él y el obstáculo o irregularidad. De este modo es posible determinar el tamaño de los obstáculos que se deberán evadir, lo que implica una acción directa del control de dirección, y en cualquier otro caso el móvil seguirá de frente y conseguirá franquearlo.

Autonomía

El sistema está alimentado con una batería de seis voltios y 2.200 miliamperios hora, lo que le brinda una autonomía de 50 minutos en terrenos planos y 40 minutos en terrenos irregulares, dados los requerimientos de corriente de los motores. Con el ánimo de prolongar al máximo la duración de la batería, los sensores permanecen apagados hasta momentos antes de la toma de datos.

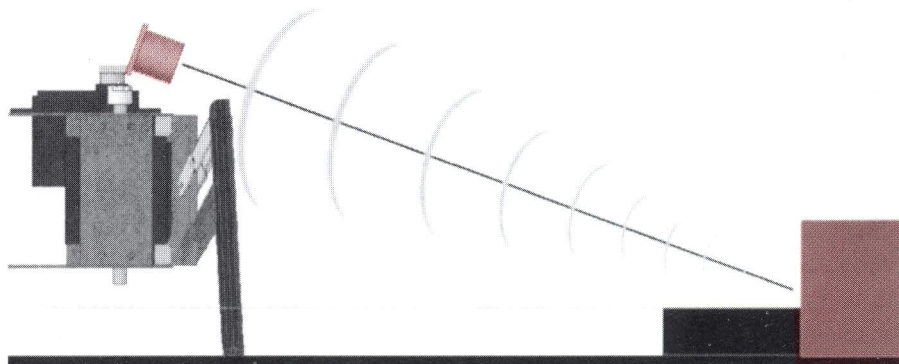


Figura 18. Estrategia para definir si un obstáculo es franqueable.

La mayor parte de la energía se utiliza en el avance y estabilización de la plataforma móvil más que en los procesos de toma de datos, procesamiento de la información y control.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos son satisfactorios, aunque se presentaron problemas en la construcción del prototipo ya que localmente no se dispone de maquinaria capaz de realizar dobles tan unidos en láminas tan pequeñas. Aunque el proceso propuesto para la fabricación de las piezas de lámina doblada es el troquelado, éste se realizó de manera artesanal puesto que los costos de producir un molde de troquelaría resultan muy elevados.

El desempeño del robot en ambiente controlado, como en un laboratorio, con terrenos planos resulta más que satisfactorio, y en terrenos irregulares mantiene su movilidad y estabilidad, aun cuando su velocidad de desplazamiento se ve disminuida. En líneas generales, el comportamiento y el desempeño del robot caminador hexápodo son los esperados.

CONCLUSIONES

- El proceso de diseño, llevado a cabo a través de *software* de modelamiento mecánico especializado, ofrece gran-

des ventajas sobre los sistemas clásicos, ya que permite verificar problemas frecuentes en los ensambles, como las interferencias y los ajustes necesarios para un correcto funcionamiento de la máquina. Las herramientas computacionales existentes para la simulación de esfuerzos, deformaciones y movimientos de los sistemas mecánicos agilizan el proceso de producción de prototipos, pues se pueden visualizar y analizar variables de diseño dentro de un entorno de realidad virtual que asemeja con gran fidelidad los resultados que se obtendrían en el mundo real. Es fundamental para el ingeniero del siglo XXI llevar a cabo sus proyectos con el enfoque del CAE (ingeniería asistida por computador, por su sigla en inglés) en cualquiera de sus disciplinas, ya que el aprovechamiento del computador revoluciona totalmente los tiempos necesarios para la generación y análisis de propuestas, y las simulaciones reducen ostensiblemente los costos de producción de prototipos.

- Cuando se piensa en robótica móvil, no se hace alusión a grandes cantidades de producción, sino que por el contrario siempre se desarrollan los proyectos a manera de prototipos, pero cuando se piensa en producción en serie se involucran otras variables como la estandarización de piezas, la factibilidad y costos de fabricación y los materiales. La elección del proceso de troquelado, de la lámina de acero CR como material y el diseño particular de las piezas, hace posible la elaboración de grandes cantidades de estos robots, disminuyendo visiblemente los costos y tiempos de producirlos.

- La utilización de los controladores difusos facilita notablemente la tarea de diseño e implementación de un control particular para una planta. La base de conocimiento de la dinámica de la planta se dividió en dos grandes bloques que simplificaron notablemente el manejo del robot y que permitieron imple-

mentar todo el sistema en un microcontrolador de propósito general.

- El controlador se creó con una mínima cantidad de reglas y conjuntos difusos para reducir la complejidad del sistema de inferencia y observar los comportamientos de toma de decisión frente a las situaciones que se le presenten durante la marcha.

- Es necesario continuar con trabajos en el área de la robótica móvil articulada, puesto que es un frente de investigación interesante, que brinda muchas posibilidades en la solución de problemas de transporte de equipo especializado en terrenos de difícil acceso.

TRABAJOS POSTERIORES

Diversos investigadores están trabajando en la aplicación de algoritmos de control neurodifusos (Anfis, principalmente) y de coordinación de movimientos para cada una de las extremidades en forma independiente. El trabajo consistirá en:

- Diseñar un robot con mayor número de grados de libertad (doce o más) e implementar estrategias de control de este tipo que ofrezcan mayores prestaciones tanto de versatilidad como de velocidad en el movimiento.

- Implementar un sistema de visión artificial con el cual pueda identificar objetos de interés y navegar utilizando técnicas convencionales de reconocimiento de imágenes.

- Implementar un sistema de guía basado en un GPS, para que el robot pueda ubicarse de manera global en el espacio de trabajo, y a través del cual se le puedan programar tareas de recorridos específicos, o pueda ubicar objetos con base en coordenadas geográficas.

- Desarrollar patrones de conducta social y trabajo en equipo con individuos de su mismo género, para utilizar varios robots en la solución de problemas de búsqueda o de transporte de objetos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bailey, S.A., Cham, J.G., Cutkosky, M.R., Full, R.J., "Comparing the Locomotion Dynamics of the Cockroach and a Shape Deposition Manufactured Biomimetic Hexapod", Center for Design Research. Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
- Bailey, S.A., Cham, J.G., Cutkosky, M.R., Full, R.J., "Biomimetic Robotic Mechanisms via Shape Deposition Manufacturing", in *Robotics Research: the 9th Intl. Symposium*, J. Hollerbach and D. Koditschek (eds.), Londres, Springer-Verlag, 2000, in press.
- Cruse, H., The control of the body position in the stick insect (*Carausius morosus*), when walking over uneven surfaces, *Biol. Cybern.*, No. 24, 1976, pp. 25-33.
- Cruse, H., A new model describing coordination pattern of the legs of a Walking Stick Insect, *Biological Cybernetics*, 1997, pp. 107-113.
- Clark, J.E., Cham, J.G., Bailey, S.A., Froehlich, E.M., Nahata, P.K., Full, R.J., Cutkosky, M.R., "Biomimetic Design and Fabrication of a Hexapedal Running Robot", in International Conference on Robotic Automation, IEEE 2001.
- Cham, J.G., Bailey, S.A., Cutkosky, M.R., "Robust Dynamic Locomotion through Feedforward-Preflex interaction", Center for Design Research, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
- Dean, J., A Model of Leg coordination in the stick insect, *Carausius morosus*: I. A geometrical consideration of contralateral and ipsilateral coordination mechanism between two adjacent legs, *Biological Cybernetics*, 1991, pp. 393-402.
- Full, R.J. and Ahn, A., Static forces and moments generated in the insect leg: Comparison of a three-dimensional musculoskeletal computer model with experimental measurements, *J. Exp. Bio.*, 1995, No. 198, pp. 1285-1298.
- H.J. et al., A design concept for Legger robots derived from walking stick insect Weidemann, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1993, pp. 545-552.
- Jang, J. Sun, C. y Mizutani, E., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall Inc., 1997, pp. 47-89.
- Pfeiffer, R., Artificial and Natural Walking Machines, Neural Networks, "Cruse Control". Artificial Intelligence Seminar, Spring 2002.
- Vogel, S., Better bent than broken. *Discover*, May, 1995, pp. 62-67.
- Xu, X., Cheng, W., Dudek, D., Hatanaka, M., Cutkosky, M.R., and Full, R.J., "Material Modeling for Shape Deposition Manufacturing of Biomimetic Components", Admitted for publication, Asme DETC 2000 Proceedings, Baltimore, Maryland, September 10-14, 2000