

Sistemas Robóticos Bioinspirados

Martínez Peña Enrique, Armendáriz Mireles Eddie Nahúm, Carbó Vela Pablo César,
Rodríguez García José Amparo, López Hernández Juan y Rocha Rangel Enrique

Universidad Politécnica de Victoria, Av. Nuevas Tecnologías 5902, Parque Científico
y Tecnológico de Tamaulipas, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, 87138

Resumen

La bioinspiración, implica encontrar inspiración en la naturaleza para crear innovaciones humanas, es decir duplicar diseños naturales en productos y tecnologías útiles para los seres humanos. En este sentido la robótica no ha quedado excluida de esta nueva forma de desarrollar productos. La robótica BEAM es una forma alternativa de la robótica tradicional, ya que analiza ésta desde un punto de vista más analógico y menos digital. Este nuevo estilo de la robótica se caracteriza, porque para realizar diseños mejorados de los robots tradicionales, se utilizan circuitos analógicos en lugar de microprocesadores. De tal manera que se logra una mayor flexibilidad, robustez y eficiencia para llevar a cabo la tarea para la que se creó.

En este trabajo se analiza como los principios básicos BEAM hacen referencia a la capacidad de una máquina para responder ante un estímulo. Se observa que dicho mecanismo utiliza los circuitos o “redes neuronales” para simular comportamientos biológicos. De tal manera que estos circuitos se comparan con los registros de desplazamiento, y se les da utilidad en la construcción de robots móviles.

Palabras clave: Robótica, bioinspiración, BEAM.

1. Introducción

El reino animal que nos rodea nos permite obtener muchas ideas para encontrar una cantidad vasta de soluciones a problemas típicos de los seres humanos; algunos ejemplos son la visión nocturna, el movimiento o traslado en lugares de difícil acceso, adaptar la apariencia del entorno, etc.

Por otro lado, muchas máquinas caminadoras y escaladoras han sido diseñadas y desarrolladas durante las últimas décadas, de las cuales algunas han

sido construidas para efectuar servicios de utilidad humana y seguridad. Mientras las ruedas son aún la forma más ampliamente usada para llevar a cabo el movimiento en robots debido a la indudable ventaja en la eficiencia carga/acarreo, las piernas son fascinantes porque ellas permiten a los robots alcanzar lugares donde sólo los humanos y los animales sobre pies pueden normalmente ir.

Para mimetizar estas habilidades se han realizado una serie de estudios y diseño de algoritmos que buscan extraer la información de estos seres vivos y transformarla en productos que demuestren la utilidad de estos en comparación con las soluciones tradicionales.

El propósito de este trabajo es considerar el aspecto de locomoción en robots biológicamente inspirados, así como exponer las técnicas para lograr estos movimientos, centrándose en el principio del Generador de Patrón Central, que ha revolucionado la forma de concebir la articulación de movimientos en extremidades así como en un tipo de diseño de robots móviles basados en circuitos electrónicos simples utilizando materiales económicos, haciendo referencia a los robots BEAM.

2. Redes neuronales celulares

La principal inspiración en el control de dispositivos de locomoción artificial proviene de un principio biológico llamado: Generador de Patrón Central (Central Pattern Generator, CPG por sus siglas en inglés) usado para modelar el grupo de neuronas encargado de planear y controlar el patrón de caminado. Para emplear dicho modelo se debe utilizar una red neuronal celular, la estructura de esta red puede ser implementada mediante circuitos analógicos [1]. Esto hace posible realizar el caminar en tiempo real y también controlar transiciones entre diversos tipos de caminata en el caso de robots bípedos, en la Figura 1 se muestra un robot del tipo antropomórfico.



Fig. 1. Robot ASIMO de la empresa japonesa Honda [2].

Las redes neuronales artificiales tienen propiedades clave como lo son el procesamiento paralelo asíncrono, la dinámica de tiempo continuo y una interacción global entre los componentes de la red. Una nueva arquitectura de circuito llamado red neuronal celular (Cellular Neural Network, CNN) fue inventada y patentada [3] en la década de los ochenta por el profesor Leon O. Chua y Lin Yang, investigadores de la Universidad de Berkeley en California. Esta nueva arquitectura además de poseer algunas de las características claves de las redes neuronales artificiales, como el procesamiento de imágenes y el reconocimiento de patrones, tiene además la característica de poder ser implementada mediante circuitos analógicos.

Los circuitos analógicos han jugado un papel importante en el desarrollo de tecnología nueva. Aún en la actual era digital, los circuitos analógicos dominan en campos como las comunicaciones, la potencia, electrónica de audio y video debido a sus capacidades de procesamiento de señales en tiempo real.

Los métodos convencionales de computación son intrínsecamente débiles en lo que a velocidad se refiere debido a su naturaleza secuencial. Para vencer este problema, se han propuesto las redes neuronales analógicas, las cuales están basadas en algunos aspectos de neurobiología y adaptado a circuitos integrados. Las características clave de las redes neuronales son el procesamiento paralelo asíncrono, dinámica de tiempo continuo y una interacción global entre los componentes de la red. Algunas de estas características son prometedoras en aplicaciones de redes neuronales para varios campos de aplicación tales como la optimización, la programación lineal y no lineal, memoria asociativa, patrones de

reconocimiento y visión computacional; pero también se han utilizado para el control de postura y movimiento de robots biológicamente inspirados [4].

2.1 Arquitectura de las CNN

Los fundamentos en los cuales se basa el Dr. Chua para generar su idea son: las redes neuronales artificiales (RNA), y los autómatas celulares (AC); de las primeras extrae la capacidad para el procesamiento asíncrono en paralelo, la dinámica en tiempo continuo y la interacción global de los elementos de la red; mientras que de los AC obtiene la estructura, o en otras palabras, la idea de distribuir sus elementos de procesamiento (también llamadas células) en rejillas regulares y permitir que la comunicación de cada célula con las otras se llevara a cabo a nivel local. Un ejemplo de una red neuronal celular de dos dimensiones es mostrada en la Figura 2. El tamaño del circuito es de 3x3. Los cuadrados son las unidades llamadas células. Las conexiones entre las células indican que hay interacción entre las células conectadas.

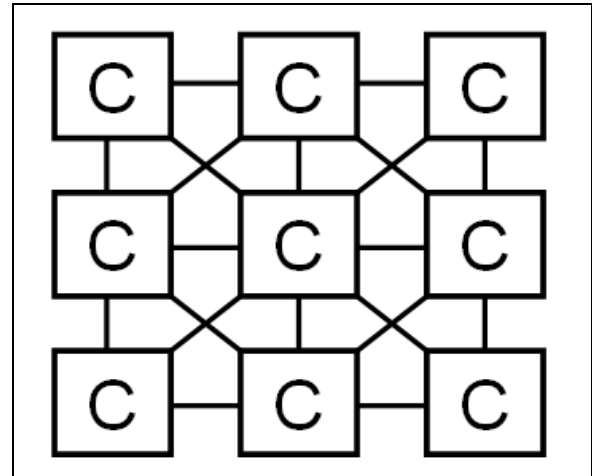


Fig. 2. Una red neuronal celular de dos dimensiones.

Matemáticamente, esta definición se escribe como [5]:

$$\frac{dx_{ij}}{dt} = -x_{ij} + \sum_{kl \in N_r(ij)} \hat{A}_{ij;kl} (y_{kl}(t), y_{ij}(t)) + \dots + \sum_{kl \in N_r(ij)} \hat{B}_{ij;kl} (u_{kl}(t), u_{ij}(t)) + I_{ij} \quad (1)$$

De la ecuación anterior:

ij Se refiere a la ij –ésima neurona en una malla de 2 dimensiones.

$kl \in N_r(ij)$ Es la kl -ésima neurona con una vecindad de radio r de la ij -ésima neurona.

x_{ij} Es el estado de la ij -ésima neurona.

$\hat{A}$ Es la plantilla de retroalimentación (feedbacktemplate).

$\hat{B}$ Es la plantilla de prealimentación, junto con A , llamada también plantilla de control (control template).

u_{ij} Es la entrada del sistema

I_{ij} Es el término de corriente de polarización (*bias*), usualmente una constante.

y_{ij} Es la salida de la ij -ésima neurona

Por otro lado, la función de salida se representa como:

$$y_{ij} = f(x_{ij}) \quad (2)$$

Donde, $f(x_{ij})$ es una función de salida no lineal, llamada también función de umbral. Existen diferentes funciones de salida no lineales [5]: sigmoide, unitaria, gaussiana, etc., se dice que si $\hat{B}=0$ para cada neurona, entonces la *CNN* es autónoma.

Una de las aplicaciones de las *CNN* es en llevar a cabo la función de un Generador de Patrón Central. En la siguiente sección se explora este principio.

2.2 Generador de Patrón Central

Los movimientos que realizan los animales cuando éstos ejecutan funciones tales como; correr, caminar, nadar, volar, etc., se llevan a cabo empleando patrones periódicos en sus extremidades. La hipótesis relacionada propone la existencia de un Generador de Patrón Central (CPG) que se encarga de realizar estas oscilaciones. Estudios realizados sobre cómo los animales realizan sus movimientos, revelan que el patrón de actividad locomotora se debe a un patrón de actividad neuronal.

El principal componente del sistema motriz es el CPG, un circuito neuronal que produce un patrón motriz rítmico sin necesidad de sensores que retroalimenten o controlen. Se localiza generalmente en la espina cordal en los vertebrados o en los ganglios en los invertebrados.

El CPG incluye el mecanismo neuronal necesario para la generación rítmica coordinada neuro-motora y por lo tanto de la salida del sistema,

es decir los músculos. La salida del CPG controla directamente los órganos efectores (piernas, brazos, dedos, etc.) mientras que las señales que recibe del control neuronal superior sólo son necesarias para iniciar el movimiento, pero no para generar el patrón correcto de movimiento.

Existen diferentes enfoques acerca del diseño del CPG, pero en general explican que las señales se obtienen utilizando osciladores neuronales [6]; los cuales se pueden implementar digitalmente en VLSI (Integración en Escala Muy Grande, por sus siglas en inglés) chip o FPGA, pero además pueden ser implementados analógicamente, utilizando amplificadores operacionales.

De esta manera Arena y Fortuna desarrollaron un nuevo enfoque y nuevas arquitecturas para el control de la locomoción en dispositivos mecánicos, utilizando las *CNN*, pudiendo crear patrones de caminar para emular el andar de insectos de varias patas, tales como los cuadrúpedos y hexápodos (En la Figura 3 del lado izquierdo se observa un robot hexápodo de la empresa Parallax, en el extremo derecho un escarabajo de nombre *Titanus giganteus*). Para crear el patrón de caminar sólo es necesario hacer uso del operador de retroalimentación A .

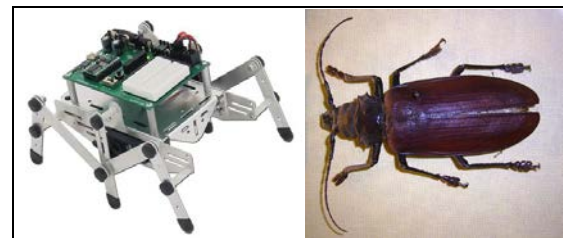


Fig. 3. Robot hexápodo mimetizando insecto de la familia de los cerambícidos [7].

3. Redes Neuronales Nerviosas

B.E.A.M. es una filosofía para construir robots que utiliza principalmente la electrónica clásica, la analógica, y no tanto la electrónica digital avanzada, los microcontroladores. Sus siglas en inglés son Biology, Electronics, Aesthetics and Mechanics. Es decir: Biología, Electrónica, Estética y Mecánica, son robots que mimetizan características de vida de los animales, como los insectos [8]. El creador de esta filosofía es Mark Tilden [9], desde principios de los años noventa.

Los circuitos electrónicos de los robots tipo BEAM están fundamentados en neuronas que hasta cierto punto son semejantes a aquellas que se pueden encontrar en un sistema biológico. Una Neurona

Nerviosa (Nv) BEAM consiste en un pulso de electricidad desfasado en tiempo que se puede usar como un transmisor de información en un sistema BEAM. El circuito básico de una neurona Nv que funciona como un generador de pulsos fue diseñado por Mark Tilden y es el que se muestra en la Figura 4 [10].

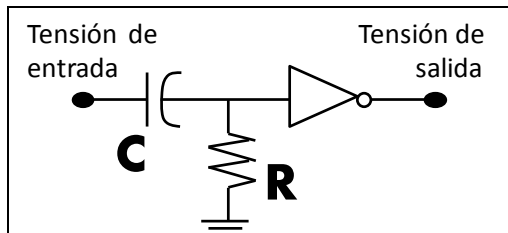


Fig. 4. Circuito básico de neurona Nv.

Esta neurona generadora se denomina Core. El circuito está compuesto por un resistor, un condensador y una compuerta inversora. El circuito RC establece el pulso y la frecuencia del circuito. La compuerta invierte la tensión que pasa a través de ella.

La salida de una neurona Nv no puede entregar tensión negativa, ya que la compuerta inversora sólo entrega niveles de tensión TTL (rango de 0 a 5 v). Por lo tanto, se necesitan dos neuronas Nv para conducir un único motor en ambas direcciones. El resultado es el movimiento (para el caso de un hexápodo) de las piernas hacia adelante y hacia atrás en un ritmo que está determinado a la vez por la señales y por los tiempos de duración de los elementos de la red nerviosa; cuando dos neuronas Nv se conectan en espejo, el circuito se denomina Bicore [10].

3.1 Desarrollo de la robótica B.E.A.M.

De los primeros robots construidos por Mark W. Tilden, el robot BEAM tipo Solaroller, lo terminó en 1989 en la Universidad de Waterloo en Canadá. Estos robots, como la mayoría de los robots surgidos a partir de la filosofía BEAM, utilizan como fuente de energía la luz solar, y su única función es el movimiento en una sola dirección mediante una o varias ruedas. En la Figura 5 se aprecia un robot Solaroller que la empresa Solarbotics [11] comercializa por internet, tiene la característica de trasladarse tres metros después de captar energía solar por 40 segundos.

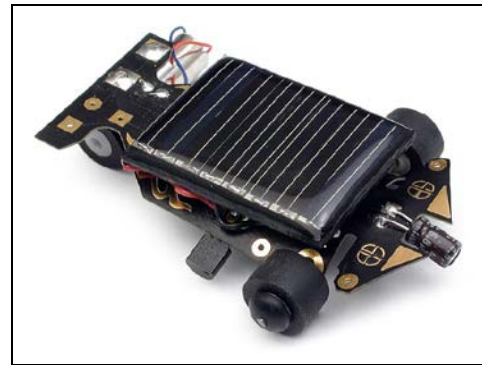


Fig. 5. SolarboticsSolarSpeeder v2.0.

Otro ejemplo de los primeros diseños que Tilden implementó fue el robot WALKMAN que construyó entre 1994 y 1995. Recibe su nombre debido a que utilizó piezas del famoso reproductor de audio portátil de la empresa japonesa Sony. Tiene cuatro extremidades, utiliza una sola batería, las patas tienen 360 grados de libertad de movimiento, lo cual proporciona una gran flexibilidad para escalar y trasladarse sobre diferentes tipos de terrenos. En la Figura 6 se observa un robot tipo Walker modelo VBUG 1.5, éste tipo de robot abandona en parte la filosofía BEAM al no utilizar como fuente de energía la luz solar.

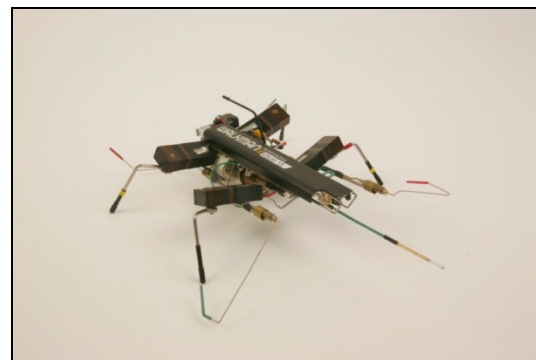


Fig. 6. Robot Walkman VBUG 1.5 [12].

Como puede observarse muchas de las piezas que se requieren para construir robots BEAM son recicladas de dispositivos electrónicos dañados o en desuso.

Es por ello que el diseño de robots bioinspirados se sustenta en los principios de la vida, de tal forma que instruyen a emplear luz solar, usar sólo la energía necesaria, adaptarse a la forma para funcionar, reciclar, premiar la cooperación; todo esto basado en la sustentabilidad del medio.

Por otro lado, otro tipo de robots son los Photovores (ver Figura 7) que consisten en la unión de dos motores a cada uno de los cuales se les asocia

un Solaroller. La diferencia radica en que en vez de tener un movimiento lineal, puede girar dependiendo de la cantidad de luz solar que recibe cada circuito.

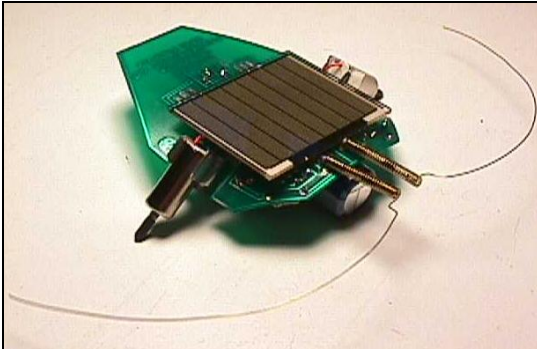


Fig. 7. Robot Photovore [13].

Como puede observarse en este breve trabajo, se tiene que la bioinspiración imita los procesos naturales, lo cual permite realizar diseños robustos; en términos de locomoción, un modelo con forma de insecto posee un mejor desempeño para trasladarse en diversos terrenos, tales como aquéllos con superficies inclinadas.

Una disyuntiva en la filosofía BEAM radica en que al no utilizar dispositivos basados en microprocesador, las capacidades de los sistemas robóticos están acotadas a movimientos cíclicos y repetitivos.

Aunque en parte esto es cierto, no hay que olvidar lo más interesante de la ideología BEAM, por un lado utilizar celdas solares que los hace prácticamente autónomos y utilizar sistemas biológicos como fuente de inspiración en los diseños.

4. Conclusiones

Sin duda, los sistemas biológicos permiten realizar diseños de ingeniería más robustos que generan nuevas alternativas de locomoción e incluso cierto nivel de abstracción de comportamiento en los robots. Se debe hacer énfasis en como la filosofía BEAM busca crear este tipo de diseños teniendo como referencia organismos biológicos, pero además busca que el diseño sea sustentable buscando no solo imitar a la naturaleza, sino también contribuir a ayudarla al reciclar los desechos electrónicos utilizados en la construcción de los insectos biomiméticos.

Para el desarrollo de esta tecnología se requiere de gran ingenio, el necesario para poder integrar, compactar y minimizar toda la tecnología

necesaria, desde la electrónica analógica, sistemas de inteligencia artificial como las neuronas artificiales, hasta llegar a las tecnologías de energías alternas, como lo son las celdas solares.

Teniendo todo esto en mente, es posible crear diseños bioinspirados que logren una simbiosis entre tecnología y naturaleza.

Referencias

- [1] Arena, P., Fortuna, L., "Analog Cellular Locomotion Control of Hexapod Robots", IEEE Control Systems Magazine (2002) 21-36.
- [2] Información en:
<http://www.motortrader.com.my/news/non-starter/asimo-3/>
Última consulta: Enero 2013.
- [3] Chua L.O., Lin Yang "Cellular Neural Networks" US Patent, 5140670. (1992).
- [4] Maneesilp, K., Purahong B., Sooraksa, P., "A new analog control circuit design for hexapod using cellular neural network", Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan, Korea (2004).
- [5] Chua, L., Roska, T., "The CNN paradigm", IEEE Transactions on circuits and systems, vol. 40, no. 3, (1993) 147-156.
- [6] Kurita, Y., Ueda J., Matsumoto Y., Ogasawara, T., "CPG-Based Manipulation: Generation of Rhythmic Finger Gaits from Human Observation", IEEE International Conference on Robotics & Automation (2004) 1209-1214.
- [7] Información en
<http://www.robotshop.com/parallax-hexapod-crawler-kit-for-boe-bot-robot-3.html>
Última consulta: Abril 2013.
Empresa: Parallax Inc.
- [8] Dongrui Wu, Woei Wan Tan, PrahladVadakkepat, "A Comparison of Several Hardware-Realized Central Pattern Generators (CPGs)", Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore.
- [9] B. Haslacher, M. Tilden, "Living machines, in Robotics and Autonomous Systems: The Biology and Technology of Intelligent Autonomous Agents", L. Steels, Ed. Elsevier, 1995.

- [10] WouterBrok; “*Suspended Bicore*” Eindhoven, The Netherlands. 1999.
- [11] Información en
https://solarbotics.com/product/k_ss/
Última consulta: Febrero 2013.
Empresa: Solarbotics Ltd.
- [12] Información en
<http://grant.solarbotics.net/walkman.htm>
Última consulta: Mayo 2013.
- [13] Información en
<http://chiumanfu.solarbotics.net/>
Última consulta: Abril 2013.
Autor: Chiu-Yuan Fang.