

# Diseño e Implementación del Sistema Electrónico y Comunicación para el Control un Robot Modular Tipo Serpiente

Development of the electronic and communication system for control a modular snake-like-robot

Javier Camilo Torres Vera, Daniel Armando Gómez, Hernando León-Rodríguez

## Resumen

**E**ste proyecto consiste en el desarrollo de un sistema electrónico para manipular a un robot serpiente de manera modular; se implementaron tarjetas electrónicas en una relación maestro-esclavas para el control articular de cada módulo mecánico. Estas tarjetas se componen de un DSPic30F4011, microcontrolador de 16 bits de Microchip que incorpora el módulo CAN, protocolo esencial para la comunicación entre tarjetas, salidas PWM para el control de motores, puertos análogos y digitales; como también un socket para conectarse a un dispositivo externo a través de la UART. El firmware ha sido escrito en MikroC Pro. Cada microcontrolador implementa una ecuación característica proveniente de las curvas de Hirose para generar un movimiento serpentino. Este movimiento se simuló usando ROS (Robotic Operating System) en Rviz y finalmente se implementó en el prototipo robot.

**Palabras clave:** Sistema Electrónico- Comunicación

## Abstract

**T**his Project consists of the development of an electronic system to manipulate a snake like robot in a modular way. The electronic cards were implemented in a master-slave relationship for joint control of each mechanical module. These cards are composed of a DSPic30F4011, microchip 16-bit microcontroller that incorporates the CAN module, essential protocol for communication between cards, PWM outputs for motor control, analogue and digital ports; as well as a socket to connect to an external device through the UART. The firmware has been written in MikroC Pro. Each microcontroller implements a characteristic equation from the Hirose curves to generate a serpentine movement. This movement was simulated using ROS (Robotic Operating System in Rviz).

**Key words:** electronic- communication system

Recibido / Received: Julio 12 de 2017 Aprobado / Approved: Agosto 22 de 2017

Tipo de artículo / Type of paper: Investigación Científica y Tecnológica terminada.

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: Universidad El Bosque

Autor para comunicaciones / Author communications: hefrainl@unbosque.edu.co

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

## Introducción

El diseño estructural de una serpiente está basado en la repetición de su columna vertebral a lo largo de todo su cuerpo, donde solamente 3 tipos de huesos la componen: el cráneo, las vértebras y las costillas. La columna vertebral está compuesta entre 100 y 400 vertebras y cada vertebra permite pequeños movimientos en dirección vertical y lateral, pero la composición de tantas vertebras le permite a la serpiente una gran flexibilidad y curvatura con fuerzas dramáticamente grandes.

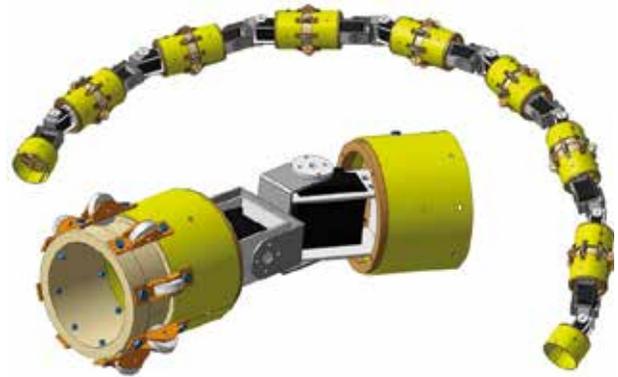
La anatomía de la serpiente estas compuesta por el mismo tipo de unión y estructura donde cada vertebra le permite una rotación en el plano horizontal de 10-20 grados y una rotación entre 2-3 grados en el plano vertical. [1] El sistema de locomoción de la serpiente es muy estable y el cuerpo está en constante contacto con el suelo en diferentes puntos, permitiendo un bajo centro de masa y gran tracción en varias superficies donde es fácil percibir su gran capacidad de atrapar una presa o subir un árbol con bajo consumo de energía.

Robots inspirados en serpientes se introdujeron en la década de 1970 por Shigeo Hirose. [2] Desde entonces, numerosos diseños de robots inspirados en serpiente han sido concebidos y construidos. Aunque los numerosos diseños de robots siguen la cinemática y locomoción imitando a la serpiente, pueden cambiar enormemente en su configuración física y propósito. Por ejemplo, algunos robots son redundantes, otros son hiper-redundantes mientras que otros pueden no tener redundancia en absoluto. [3] los primeros diseños de snake- robots utilizaban ruedas motrices u orugas, mientras que en la actualidad pueden usar llantas pasivas o sin ruedas en absoluto. [4] Algunos diseños son anfibios y se pueden desplazar sin esfuerzo entre los ambientes terrestres y el agua. [1][6][8] Sin embargo, la demanda de nuevos tipos de robots está todavía presente para aplicaciones de rescate e inspección, donde no exigen un robot capaz de negociar dichas condiciones y dificultades en líneas de alcantarillado, redes de agua y pantanos. Los robots basados en serpientes delgadas y flexibles satisfacen algunas de estas necesidades. [5][7][9][16]

Comercialmente, los robots para exploración de tuberías son de muchas clases, donde cada uno de ellos

cumple funciones diferentes, principalmente la de revisiones visuales de las tuberías de líneas de agua potable e hidro-sanitarios a través de captura de video. Sin embargo, las tecnologías utilizadas por estos robots son en muchos casos obsoletas, debido a que su uso es netamente industrial y el ciclo de desarrollo y de actualización es muy lento. Algunos de los más importantes de ellos, están reseñados en la bibliografía del fabricante. [17][18][19] Estos robots poseen una desventaja muy grande en donde la mayoría de ellos requieren de una logística de transporte muy costosa y pesada y para servicios de inspección donde son de difícil acceso el costo de utilización de estos equipos hace difícil su frecuente aplicación.

*Figura 1. Robot modular tipo serpiente.*

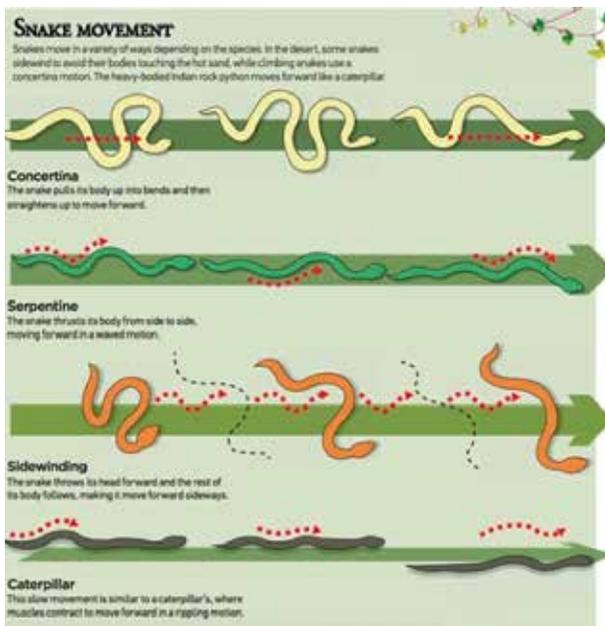


La figura 1 muestra el diseño conceptual del robot modular tipo serpiente escalable, compuesto por 7 módulos, cada uno conformado por 2 grados de libertad, generador por dos servomotores. En este sentido el diseño electrónico está enfocado de una manera modular para que cada articulación mecánica lleve su respaldo electrónico.

## Locomoción serpentina

Existen diferentes tipos de locomoción en las serpientes baso en la condición del terreno y el tipo de ambiente. En el desarrollo del proyecto las tarjetas e control puede reproducir cualquiera de las 4 formas de locomoción ver figura 2, sin embargo, las aplicaciones del sistema de control y las comunicaciones de las tarjetas se centró la locomoción serpentina, como verificación de sistema de control. [10]

Figura 2. Locomoción natural de las serpientes [15]



## Diseño del sistema electrónico

Las condiciones del diseño electrónico están basadas en los componentes necesarios para general el movimiento del robot basado en su locomoción, tamaño, diámetro corriente, aplicación y medio ambiente de desempeño.

### Potencia requerida

Las baterías seleccionadas están basadas en la potencia entregada en función del espacio y colocación de las mismas dentro del robot modular. Las baterías seleccionadas son litio-polímero de 72x34x14 mm de 1000 mAh, compuesto por dos celdas de 7.4 voltios.

### Regulación de Voltaje

Debido a la gran eficiencia de los reguladores tipo Buck step-down, luego de una evaluación en el mercado se han seleccionado en la tabla 1 los dispositivos que satisfacen los requerimientos de corriente para el manejo y control de los servomotores del robot snake, este valor es aproximadamente 2.5 Amperios.

Tabla 1. Reguladores de voltaje seleccionados

Producto	Pololu Step-Down Voltage regulator D24V25F5	Pololu Step-Down Voltage regulator D24V50F5
Vin	6 a 38 Vdc	6 a 38 Vdc
Vout	5 Vdc	5 Vdc
Idc(max)	25 A	5 A
eficiencia	85% a 95%	85% a 95%
Idc en proceso	0.7mA*	0.8mA*
Protección Voltaje inverso	Si	Si
Medidas	(17.8 mm x 17.8 mm x 8.8 mm)	(17.8 mm x 20.3 mm x 8.8 mm)

Imagen



## Protocolo de comunicación

La red propuesta para la comunicación interna del sistema electrónico en una relación maestro-esclava, se consideró realizarse mediante RS485, sin embargo, se optó por el Bus CAN, usado en la industria automovilística debido a su robusto protocolo, que corrige errores de transmisión y es invulnerable a las perturbaciones electromagnéticas, gracias a sus requisitos de capa física que son un par diferencial apantallado.

## Microcontrolador

La tabla 2 muestra las características técnicas del microcontrolador seleccionado con base en las funciones de su arquitectura de 16 bits, el protocolo de comunicación CAN incorporado, velocidad de comunicación y en su propósito final del control y posición de los servomotores.

**Tabla 2.** Características técnicas del microcontrolador.

Parámetro	Valor
Arquitectura	16-bits
Velocidad de CPU (MPS)	30
Tipo de memoria	Flash
Memoria (KB)	48
RAM (KB)	2
Rango de temperatura C	-40 a 125
Voltaje de Operación (V)	2.5 a 5.5
Puertos I/O	30
Número de puertos	40
Periféricos de comunicación digital	2-UART 1-SPI 1-I2C
Periféricos análogos	1-A/D 9x10-bits @ 1000 (ksps)
CAN (#, tipo)	1 CAN
Capture/Compare/PWM	4/4
Resolución PWM en bits	16
Canales PWM de control de motor	6
Puerto paralelo	GPIO

## Análisis matemático

Basado en los análisis cinemáticos del profesor Hirose [2] el comportamiento y locomoción de una serpiente se expresa las curvas serpenoides y sus trayectorias articulares. [1][2][10][14].

### Curvas Serpenoidales-Hirose

Las siguientes ecuaciones expresan las curvas serpenoides. Donde S, representa la longitud del segmento a lo largo de la serpiente; a, b y c son parámetros que determinan la forma de la curva.

$$X(s) = \int_0^s \cos(a \cos b\theta + c\theta) d\theta$$

$$Y(s) = \int_0^s \sin(a \cos b\theta + c\theta) d\theta$$

## Trayectorias Articulares

Las trayectorias articulares determinan los ángulos que las articulaciones deben desarrollar respecto al tiempo para generar la curva serpenoide generada con (1) y (2), estas ecuaciones son las que son ejecutadas por los microcontroladores de cada tarjeta electrónica, con el fin de controlar los servomotores en función de la siguiente ecuación. Esta expresión (3) contiene un nuevo componente w, el cual está determinado por  $2\pi f$ , donde f es la frecuencia con la que se realizará la curva generada por (1) y (2)

$$\theta_i(t) = 2a \sin(\pi t + (i-1)\pi) + \pi$$

Donde (4), (5) y (6) provienen de los mismos parámetros a, b y c de la curva serpenoide, [11]

$$a = \frac{b}{n}$$

$$c = \frac{\pi c}{n}$$

$$\theta = 2a \left| \sin \frac{\theta}{2} \right|$$

Dónde: i, es el número de la articulación, es decir la primera articulación tendrá una ecuación con i=1, la segunda con i=2 y así sucesivamente.

## Simulación de la cinemática del robot

La simulación comprende la implementación de las trayectorias articulares en los módulos mecánicos de del robot, para esto se ha llevado el diseño de robot al formato URDF aceptado por el simulador RVIZ y mediante los Publisher y subscriber de ROS se envían los ángulos calculados con las ecuaciones de las trayectorias a RVIZ. [12][13]

## Análisis de resultados

El desarrollo del proyecto muestra diferentes resultados basados primero en la tarjeta electrónica diseñada; además se presentan los análisis matemáticos de la cinemática, los resultados de la simulación del sistema robóticos en ROS, y las pruebas finales del prototipo.

## Tarjeta electrónica

La figura 3 muestra la tarjeta electrónica que se implementó en cada uno de los módulos mecánicos de la estructura del robot, esta permite la condición de control tipo maestro-esclavo; en donde, un único diseño de tarjeta permite ser configurada como maestro o como esclavo según la necesidad. Cada tarjeta es identificada con un código interno que permite saber su localización en la estructura robótica

Figura 3. Render tarjeta de control.



La tabla 3 muestra las especificaciones técnicas de la tarjeta diseñada; mostrando los protocolos de comunicación adaptables al sistema, voltaje de control y puestos de entrada y salida.

Tabla3. Características técnicas tarjeta diseñada snake.

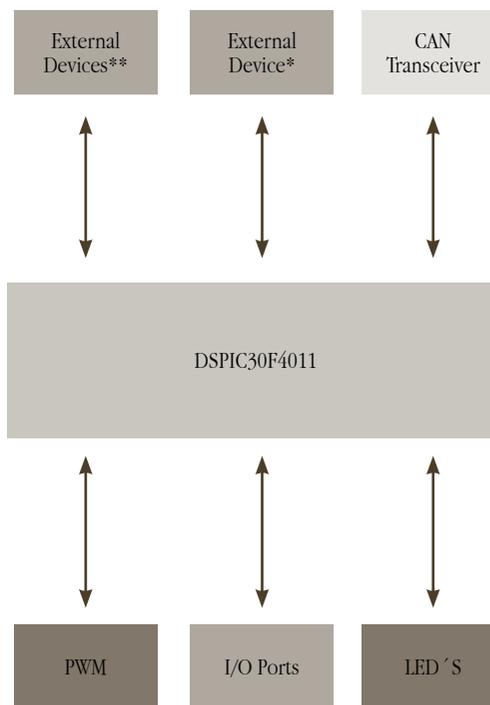
Parámetro	Condiciones
Fuente de voltaje	7.0 – 36 Vdc
Núcleo uC	DSPIC30F4011
Frecuencia de oscilación -CPU	20 MHz
Voltaje Lógico	5 Vdc
Rango de temperatura C	-40 a 125
Puertos análogos	Hasta 5
Puertos Digitales	Hasta 7
Módulo CAN	1 Módulo
I2C	1 Módulo

Parámetro	Condiciones
UART	1 Módulo
LED	3 LED's
Protección	Fusible 2,5 y/o 5 Amperios

El sistema de control y comunicación de la tarjeta desarrollada está enmarcado en la figura 4; esta muestra el diagrama de cualquier dispositivo con voltaje lógico y de suministro de 5 V, tal como módulos RF, Bluetooth, wifi que soporten la interface TTL/UART

El diagrama presenta además los protocolos de comunicación CAN; Uart, I2C que permiten controlar cualquier dispositivo como sensores, servomotores, leds, etc, que soporten la interface.

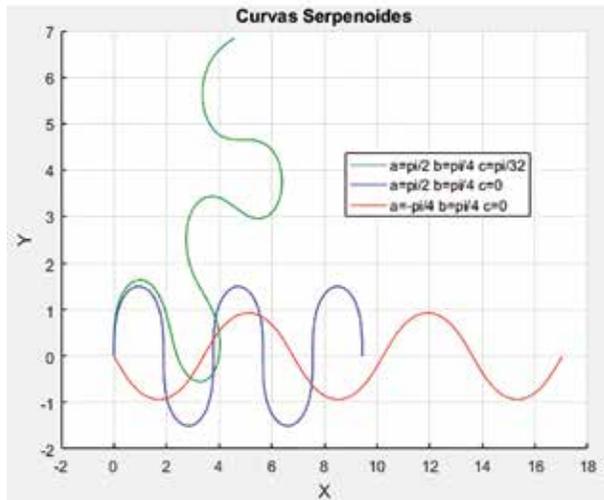
Figura 4. Diagrama de bloques de la tarjeta electrónica



## Análisis matemático

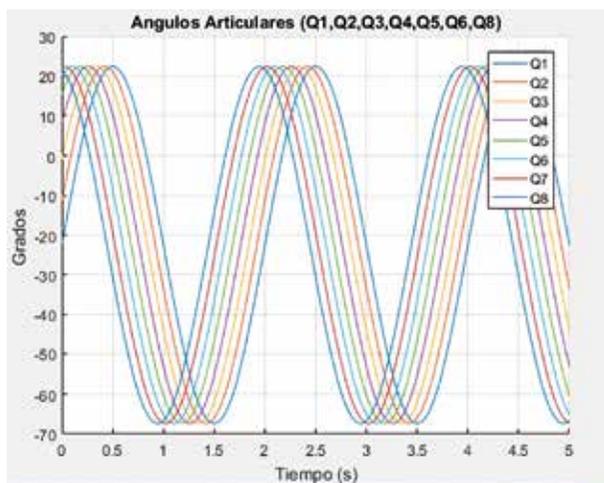
La figura 5 muestra las diferentes curvas serpenoides generadas mediante la modificación de diferentes parámetros en el control, como frecuencia, amplitud y desfase.

**Figura 5.** Simulación del comportamiento y locomoción del robot modular tipo serpiente.



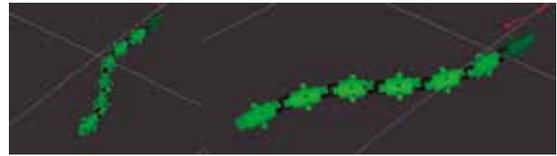
Las figuras 5 y 6 muestran las simulaciones de cada unión del sistema robótico que contienen los ángulos articulares respecto al tiempo con diferentes parámetros a, b y c, con base a las ecuaciones 1 y 2.

**Figura 6.** Ángulos articulares respecto al tiempo:  $a=\pi/2$ ,  $c=\pi/2$   $w=2\pi*(0.5)$



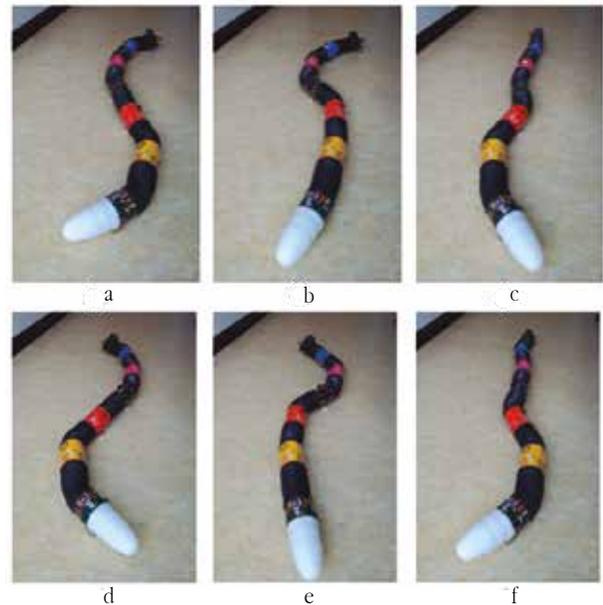
Las gráficas 5 y 6 muestran el recorrido articular de cada uno de los módulos para completar la curva serpenoide, cabe aclarar que en estas gráficas se desarrollaron con  $n=8$ , es decir 8 articulaciones, sin embargo, los resultados son muy similares con 7 articulaciones.

**Figura 7.** Resultado de la Simulación del robot desarrollando curva serpenoide en RVIZ-ROS



Con la simulación en RVIZ ver figura 7, se pudo evidenciar que el robot podría moverse de una manera serpenoide. Sin embargo, en esta primera implementación, no se consideraron aspectos como el peso del robot, la fricción y la uniformidad de suelo.

**Figura 8.** Secuencia de movimiento –robot snake.



La figura 8 muestra la implementación final de locomoción del robot snake basado en el movimiento serpenoide.

## Conclusiones

Este proyecto presenta de manera superficial los criterios de diseño para un sistema electrónico en particular para controlar un robot, estos deben abarcar su unidad de procesamiento como lo es el microcontrolador, su fuente de alimentación y regulación, los periféricos que se deben contemplar, ya sea que se quiera hacer uso de sensores. Seguir las normas como las establecidas en la IPC-2221 para desarrollar PCB con altos estándares

de calidad. A si mismo presenta la importancia de un análisis matemático en cuanto a la robótica y su respectiva simulación para comprobar su eficacia. Sin embargo, hay un lapso enorme entre la simulación y la puesta en marcha, puesto que no se contemplaron variables físicas como fricción y peso del robot sino las posiciones y los ángulos articulares en RVIZ., dando como resultado de la ejecución del control sobre el robot, un movimiento serpentino relativamente cercano al sistema simulado.

## Agradecimientos

Este proyecto agradece de manera sincera los aporte hechos para el desarrollo de las tarjetas de control por los investigadores: Michael Canu, Cecilia Murrugara; y muy especialmente al Investigador Juan David Hernández de la Universidad de Girona por su valioso aporte y conocimiento en el manejo y control de ROS.

## Bibliografía

- [1] J. K. Hopkins, B.W. Spranklin, and S.K. Gupta, A survey of snake-inspired robot designs. *Bioinspiration and Biomimetics*, 4(2):021001, 2009.
- [2] Shigeo Hirose and Hiroya Yamada, Snake-Like Robots, *Machine Design of Biologically Inspired Robots*, IEEE Robotics & Automation Magazine, March 2009
- [3] Kevin J. Dowling, *Limbless Locomotion: Learning to Crawl with a Snake Robot*, The Robotics Institute Carnegie Mellon University and NASA Graduate Fellowships, December 1997.
- [4] Saori Sugita, Kazunori Ogami, Guarnieri Michele, Shigeo Hirose, and Kensuke Takita, A Study on the Mechanism and Locomotion Strategy for New Snake-Like Robot Active Cord Mechanism—Slime model 1 ACM-S1, *Journal of Robotics and Mechatronics* Vol.20 No.2, 2008.
- [5] Cornell Wright, Austin Buchan, Ben Brown, Jason Geist, Michael Schwerin, David Rollinson, Matthew Tesch, and Howie Choset, Design and Architecture of the Unified Modular Snake Robot, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 14-18 May 2012.
- [6] Shumei Yu, Shugen Ma, Bin Li, Yuechao Wang, An Amphibious Snake-like Robot: Design and Motion Experiments on Ground and in Water, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Information and Automation*, June 22 -25, 2009, Zhuhai/Macau, China.
- [7] Aksel A. Transeth, Remco I. Leine, Christoph Glocker and Kristin Y. Pettersen, 3D Snake Robot Motion: Nonsmooth Modeling, Simulations, and Experiments, *IEEE transactions on robotics*, vol. 24, no. 2, April 2008.
- [8] Hiroya Yamada and Shigeo Hirose, Study of a 2-DOF Joint for the Small Active Cord Mechanism, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, May 12-17, 2009.
- [9] A.J. Ijspeert and A. Crespi; Online trajectory generation in an amphibious snake robot using a lamprey-like central pattern generator model, *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, pages 262-268,
- [10] David Rollinson; *Control and Design of Snake Robots*; School of Computer Science Carnegie Mellon University, 2014.
- [11] Chaohui Gong, Matthew J. Travers, Henry C. Astley, Lu Li, Joseph R. Mendelson, Daniel I. Goldman and Howie Choset; Kinematic gait synthesis for snake robots; *The International Journal of Robotics Research* 1–14, DOI: 10.1177/0278364915593793, 2015
- [12] Filippo Sanfilippo, Øyvind Stavadahl and Pal Liljeback; SnakeSIM: A Snake Robot Simulation Framework for Perception-Driven Obstacle-Aided Locomotion; *Proceeding of the 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM)*, Kyoto, Japan, 2017.
- [13] Filippo Sanfilippo, Øyvind Stavadahl and Pal Liljeback; SnakeSIM: a ROS-based Rapid-Prototyping Framework for Perception-Driven Obstacle-Aided Locomotion of Snake Robots; *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2017)*.

- [14] Stian Grøttum Danielsen; Perception-Driven Obstacle-Aided Locomotion for snake robots, linking virtual to real prototypes; Norwegian University of Science and Technology, 2017
- [15] Alexandru Micu ; Research of snakes' straight-line movement could power the rescue bots of the future; January 15th, 2018 [online] <https://www.zmescience.com>
- [16] Biorobotics laboratory; <http://biorobotics.ri.cmu.edu/projects/modsnake/>
- [17] Rausch Electronics USA; <http://rauschusa.com/>
- [18] Aries Industries; <http://www.ariesindustries.com/>
- [19] Ibak; <http://www.ibak.de>

## Los Autores



### **Javier Camilo Torres Vera**

---

Comenzó la carrera de ingeniería electrónica en la Universidad El Bosque en Bogotá, Colombia. A lo largo de su carrera ha demostrado gran capacidad y desarrollo en el área de electrónica y software recibió varios premios relacionados con muestra semestral del proyecto del programa de ingeniería, éste proyecto fue parte de su trabajo de grado.



### **Daniel Armando Gómez**

---

Comenzó la carrera de ingeniería electrónica en la Universidad El Bosque en Bogotá, Colombia. A lo largo de su carrera ha demostrado gran capacidad y desarrollo en el área de electrónica y software recibió varios premios relacionados con muestra semestral del proyecto del programa de ingeniería, éste proyecto fue parte de su trabajo de grado.



### **Hernando Leon Rodriguez**

---

Awarded his Ph.D. (2008) in climbing and amphibious robot for non-destructive testing in London South Bank University- England. In 2013, he begins to research in micro robot in Chonnam National University in Korea; currently, his new research interests are bio-inspired micro robot and micromanipulation for biomedical applications. Since 2016, he has been working as a research and lecturer in several macro robots projects sponsored by El Bosque University in Colombia for industrial and medical application.