

DESARROLLO DE PROTOTIPO ROBÓTICO DE 18 GRADOS DE LIBERTAD TIPO HEXÁPODO

DEVELOPMENT OF AN 18-DEGREE-OF-FREEDOM HEXAPOD-TYPE ROBOTIC PROTOTYPE

Salvador Cano Luis Enrique¹, Maciel García Carlos Enrique², Hernández Ochoa José María³, Lua Madrigal Favio Rey⁴

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i1.362>

¹Maestría en Ingeniería Electrónica. Tecnológico Nacional de México/IT de Ciudad Guzmán, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. luis.sc@cdguzman.tecnm.mx, C. P. 49100, Av. Tecnológico #100, Ciudad Guzmán, Mpio. de Zapotlán el Grande, Jalisco, México <https://orcid.org/0009-0005-9387-7964>

²Maestría en Ingeniería Electrónica. Tecnológico Nacional de México/IT de Ciudad Guzmán, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. carlos.mg@cdguzman.tecnm.mx, C. P. 49100, Av. Tecnológico #100, Ciudad Guzmán, Mpio. de Zapotlán el Grande, Jalisco, México, <https://orcid.org/0000-0002-5285-1056>

³Maestría en Ingeniería Electrónica. Tecnológico Nacional de México/IT de Ciudad Guzmán, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. jose.ho@cdguzman.tecnm.mx, C. P. 49100, Av. Tecnológico #100, Ciudad Guzmán, Mpio. de Zapotlán el Grande, Jalisco, México, <https://orcid.org/0009-0002-7700-8302>

⁴Maestría en Ingeniería Electrónica. Tecnológico Nacional de México/IT de Ciudad Guzmán, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. favio.lm@cdguzman.tecnm.mx, C. P. 49100, Av. Tecnológico #100, Ciudad Guzmán, Mpio. de Zapotlán el Grande, Jalisco, México, <https://orcid.org/0009-0002-8971-1636>

Resumen -- Con la evolución de la ciencia y el constante mejoramiento de la tecnología, la robótica se ha convertido en una ciencia multidisciplinaria. Con los avances en la informática, mecánica, electrónica, inteligencia artificial y otras ciencias, surgen los robots actuales, calificados de inteligentes, con mejoradas extensiones sensoriales con respecto a sus antecesores. Los avances de la ciencia permiten a la robótica tener buenas perspectivas, a la vez incrementando la complejidad de la misma. En este proyecto se propone el desarrollo de un prototipo de robot tipo hexápodo, fabricado a través de diseño CAD e impreso en impresoras 3D, el control de movimiento se realiza a través de la placa de propósito ESP32, programada en lenguaje C, por el IDE de Arduino (de distribución gratuita). El propósito es tener un equipo didáctico de fabricación propia para la implementación de diferentes sistemas de control, motivo por el cual se inicia realizando el prototipo, su análisis cinemático y la aplicación de un primer algoritmo de trabajo comunicado a través de una aplicación APK desarrollada para sus movimientos.

Palabras Clave: Robótica, Hexápodo, Denavith Hartemberg.

Abstract -- With the evolution of science and the constant improvement of technology, robotics has become a multidisciplinary science. With advances in computing, mechanics, electronics, artificial intelligence and other sciences, current robots emerge, described as intelligent, with improved sensory extensions compared to their predecessors. Advances in science allow robotics to have good prospects, but at the same time increase its complexity. This project proposes the development of a hexapod-type robot prototype, which is manufactured through CAD design and printed on 3D printers, the movement control is carried out through the ESP32 purpose board, programmed in C language, by the Arduino IDE which is free to distribute. The purpose is to have a self-made teaching equipment for the implementation of different control systems, which is why the prototype is first made, its kinematic analysis and the implementation of a first work algorithm communicated through an APK application developed for their movements.

Key words – Robotics, Hexapod, Denavith Hartemberg.

INTRODUCCIÓN

Los robots hexápodos se han creado a partir de la imitación de la estructura física de insectos y artrópodos, estos se componen por tener 6 patas, las cuales tienen 3 grados de libertad (GDL), permitiendo una movilidad en terrenos a los que otros robots no son capaces de llegar. Las posibles aplicaciones incluyen la exploración en terrenos irregulares capaces de poder ser analizados.

Con la utilización de una pata con 3 GDL por cada extremidad del hexápodo, permite crear movimientos de mayor complejidad de forma omnidireccional. (Nazar Plata, 2023) Así los robots caminantes tienen el potencial de atravesar terrenos accidentados que es intransitable para vehículos de ruedas estándar.

Es con esto en mente que los robóticos están desarrollando robots andadores. Los caminantes sofisticados imitan insectos, cangrejos y, a veces, humanos. Utilizando un modelo de seis patas es posible demostrar el famoso trípode, modo de andar utilizado por la mayoría de las criaturas con patas. (Lovine, 2002)

DESARROLLO

Para reconocer la actividad de las patas o extremidades de un insecto se utiliza la definición de términos acorde al movimiento a realizar por su extremidad estos son: protracción, promovimiento, retracción, aducción, abducción, elevación, depresión, extensión y flexión; todo esto se realiza a través de los mecanismos de su extremidad (patas) con el uso de una pata de 3 grados de libertad (GDL), figura 1. El diseño de un robot hexápodo ayuda afrontando los obstáculos que se encuentren en la trayectoria de desplazamiento, siendo capaz de realizar un recorrido adecuado, rápido y en la medida de lo posible, sin sufrir percance alguno.

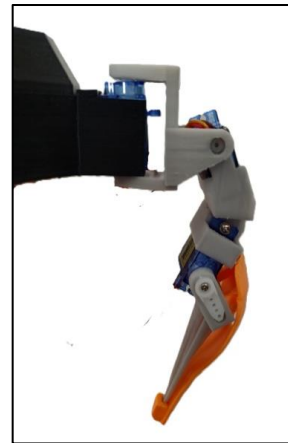


Figura 1. Imagen de extremidad de 3 GDL de Robot Hexápodo.

El sistema de locomoción empleado en el prototipo de robot, consta del movimiento sincrónico y coordinado de 6 patas, cada una con 3 grados de libertad, sumando un total de 18 servos. Una de las principales características es coordinar la secuencia de los pasos, lo anterior se resolvió mediante un sistema electrónico dedicado de arquitectura distribuida como lo es un multiplexor (controlado mediante comunicación Bluetooth).

Para el análisis de una pata se procedió a nombrar cada una de las secciones ensambladas, asemejando a las patas de una araña compensando el ángulo que tienen las extremidades de estos animales característicos, como se observa en la figura 2. También, se consideraron para el análisis de cinemática los ángulos θ_1 , θ_2 , θ_3 .

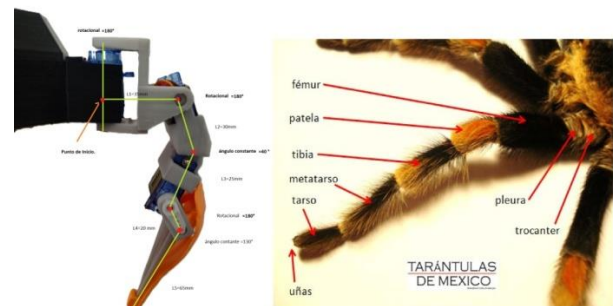


Figura 2. semejanza de pata en donde se considera fémur, patéla (considera el ángulo en físico), tibia.

Para el estudio de movilidad de la extremidad es necesario desarrollar la cinemática directa, esto a partir de las medidas de cada sección, asimismo, proponer el rango de los ángulos señalando debidamente el que se forma entre la patela y la tibia, valores que son utilizados para identificar los diferentes movimientos, esto se determinó a partir de una vista lateral (figura 3).

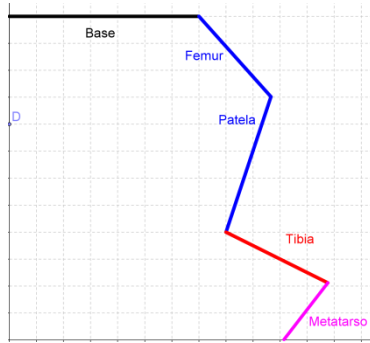


Figura 3. vista lateral de la configuración de la pata del robot hexápodo.

El ensamblaje del prototipo de hexápodo se realizó con servomotores de la denominación SG90 (figura 4), estos disponen normalmente de tres cables (a diferencia de los motores de CD que tienen únicamente dos); uno para recibir alimentación eléctrica (normalmente en color rojo), otro para conectarse a tierra (normalmente color negro o marrón, según el fabricante) y finalmente el cable de control (normalmente en color blanco, amarillo o naranja) que sirve para transmitir al servomotor de parte del microcontrolador los pulsos eléctricos, que vienen desde el multiplexor que se ubica conectado a un microcontrolador ESP32, como placa de desarrollo que ya contiene una comunicación por Bluetooth. (Torrente Artero, 2013)



Figura 4. Servomotor sg90 utilizados en robot hexápodo.

El microcontrolador ESP32 como placa de desarrollo, es una serie de microcontroladores de bajo costo y consumo con Wi-Fi integrado y Bluetooth; la serie ESP32 emplea un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 con doble núcleo, existiendo una versión de un solo núcleo, es un microcontrolador con un grado de complejidad bastante alto, como se puede observar en el diagrama a bloques, está presente en numerosos sistemas de alarmas y controladores para domótica debido al alto nivel de conectividad que ofrece lo mismo que su eficiencia en cuanto a conexiones (Schmidt, Argentina). Figura 5

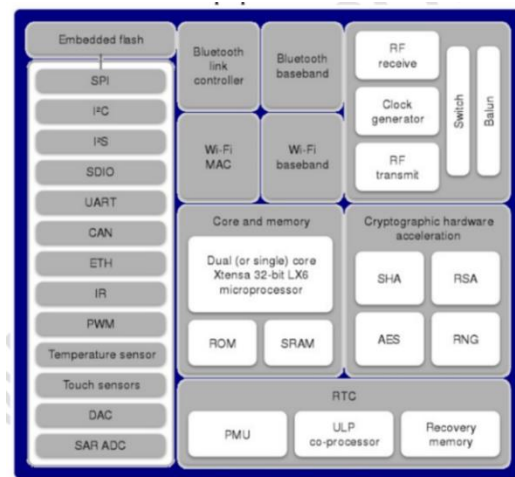


Figura 5. Diagrama a bloques de un ESP32.

El programa del Robot se desarrolla en Arduino IDE, posterior a la modelación en un software CAD, este se elaboró en una impresora 3D en donde cada una de las piezas maquinadas se visualizaron de la forma que se aprecia en la figura 6.

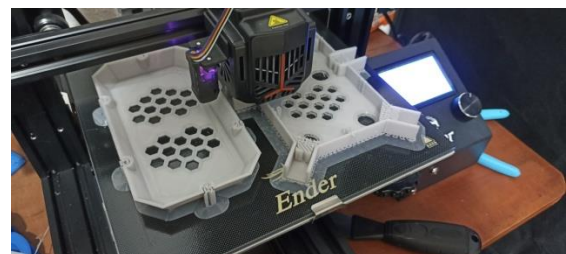


Figura 6. Impresiones de las partes del hexápodo.

Para generar un movimiento hacia el frente, se requiere de la sincronía de las patas partiendo de una posición fija y comenzado el movimiento de las patas 1,5 y 3; permaneciendo

en dicha posición para posteriormente comenzar con el movimiento de las patas 6,2 y 4, las cuales se moverán más al frente que las patas anteriores, esto se le conoce como movimiento trípedo. Figura 7 (Ollero Baturone, 2005)

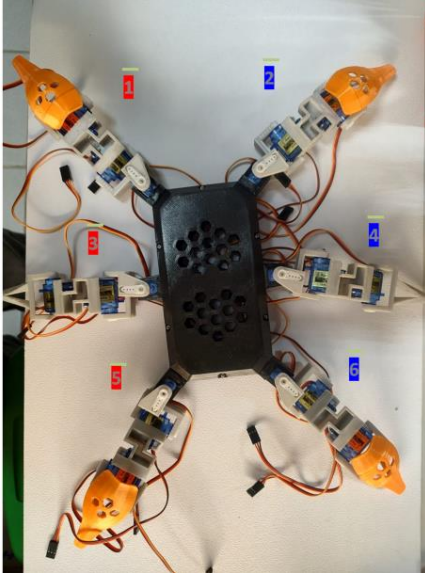


Figura 7. distribuciones de numeración de patas

En cinemática directa se cuentan con 3 ecuaciones para determinar la posición de una pata:

$$\begin{aligned}x &= l * \cos \phi_1 \\y &= l * \sin \phi_2 \\z &= l_2 * \sin \phi_2 - l_3 * \sin \phi_3\end{aligned}$$

Ecuaciones de posición para una pata

Las ecuaciones de cinemática que modelan el movimiento de una articulación están determinadas por la matriz de Denavith-Hartenberg en donde se involucran las articulaciones utilizadas, con esto se logra una representación de la orientación y posición de cada elemento que conforman la articulación de la pata de la araña. Tabla 1

Tabla1. Matriz de Denavith-Hartenberg.

Articulación	ϕ	D	a	α
1	ϕ_1	0	0	90
2	90	1	1	-90
3	ϕ_3	0	L 2	0
4	ϕ_3	0	L3	0

Al realizar la sustitución de valores en la aplicación del Editor de MatLab (archivos *.M), se obtuvo la siguiente simulación de movimiento, figura 8.

% Mostrar el robot en la nueva configuración
figure(1)

h=show(robot, config);

axis([-100 100 -100 100 -150 100]);

% Get the line objects for each link

line_handles = findobj(h, 'Type', 'Line');

% Set the color for each link

set(line_handles(1), 'Color', 'blue'); % Body 1 (Base)

set(line_handles(2), 'Color', 'red'); % Link 1

set(line_handles(3), 'Color', 'blue'); % Link 2

set(line_handles(4), 'Color', 'red'); % Link 2

% Adjust line width for better visibility

set(line_handles, 'LineWidth', 5);

hold on

quiver3(10,10,10,50,0,0,'color','red',

'LineWidth', 3);

quiver3(10,10,10,0,50,0,'color','green',

'LineWidth', 3);

quiver3(10,10,10,0,0,50,'color','blue',

'LineWidth', 3);

% Define the 88isp.88es of a cube

x = -50*[0 1 1 0 0 1 1 0];

y = 100*[0 0 1 1 0 0 1 1]-50;

z = 50*[0 0 0 0 1 1 1 1]-25;

% Define the faces (each face is a quadrilateral)

face = [1 2 3 4; 5 6 7 8; 1 2 6 5; 2 3 7 6; 3 4 8 7; 1 4 8 5];

% Create the patch object

patch('Faces', face, 'Vertices', [x; y; z],

'FaceColor', 'yellow');

hold off

%view(0, -90); % Vista desde arriba (plano XY)

%view(0, 0); % Vista de lado (plano XZ)

% Get the transformation matrices for each joint

T1 = getTransform(robot, config, 'body1');

T2 = getTransform(robot, config, 'body2');

T3 = getTransform(robot, config, 'body3');

T4 = getTransform(robot, config, 'body4');

T5 = getTransform(robot, config, 'body5');

T_foot = getTransform(robot, config, 'foot');

```
89isp.(['x: ' num2str(T_foot(1,4)) ' , y: '
num2str(T_foot(2,4)) ' , z: '
num2str(T_foot(3,4))'])
```

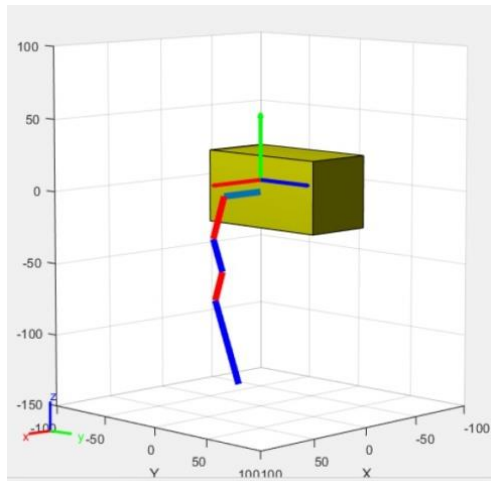


Figura 8. Imágenes de simulación en Matlab.

El sistema electrónico de conexión se observa en la imagen siguiente figura 9.

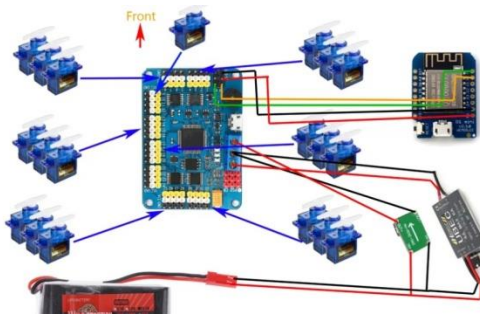


Figura 9. Conexión de servomotores a multiplexor.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como resultado de esta investigación en el desarrollo de un prototipo didáctico de robot hexápodo, se tiene un equipo para realizar prácticas de movimiento, logrando simular el movimiento de una pata, mismo que es replicado en cada una de las extremidades de manera síncrona.

La cinemática obtenida se limita solo al movimiento hacia el frente del robot (protracción), en el cual, el movimiento tiene un límite proporcionado por el ángulo de rotación del servomotor SG90, y el control del ESP32.

Una de las actividades que obtuvo gran relevancia fue el uso de un multiplexor para el control de los 18 servomotores, consiguiendo la sincronía de movimiento de acuerdo al programa desarrollado en el IDE de Arduino en lenguaje C.



Figura 10. Obtención física de la pata simulada en Matlab.

Así mismo una de las discusiones de los resultados, fue que la simulación desarrollada en Matlab, correspondía en gran porcentaje al movimiento realizado de manera física por nuestro prototipo, tanto los ángulos como las distancias que fueron equitativas con el resultado generado y obtenido, simularon de manera eficiente el caminar de la pata del hexápodo.

Algunos autores que ya han desarrollado prototipos de hexápodos como Francisco Javier Islas Vera, estudiante de la BUAP, el cual era diseñado para zonas de difícil acceso, en el cual los resultados fueron aceptables para este propósito, este prototipo contiene programación de trabajo específico.

Otros investigadores como el Maestro Jesús Ozuna Huerta de la universidad de sonora, han desarrollado prototipos de hexápodos el cual es solo mecánico, careciendo de programación o guías de trabajo en un momento dado.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este prototipo, se determinó el uso de la cinemática directa, como una alternativa de ayuda para generar los movimientos de trayectoria de cada una de las extremidades del robot hexápodo figura 11.



Figura 11. Prototipo final de robot Hexapodo.

La implementación de un algoritmo de control para la generación de nuevas trayectorias son controladas como primera alternativa por una APK, otra de las áreas de oportunidad que se generaron es la línea de investigación para la aplicación de sistemas de control, que pueden ser una alternativa desde el control clásico, hasta el control difuso o control inteligente.

La ejecución y desarrollo de modelados matemáticos por medio del algoritmo de Denavith-Hartenberg permitirá modelar la cinemática, no solo de una extremidad, sino de todos los movimientos síncronos del robot ya puesto en operación.

Para investigaciones futuras se espera anexar un nuevo tipo de circuitería de seguridad como puede ser un giróscopo que se oriente con el polo norte magnético, así mismo se puede generar una autonomía de trabajo para la evasión de objetos que no puedan ser escalables y que de esta manera decida rodear los objetos para ser evadidos y continuar su marcha a un punto definido.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por la convocatoria de proyectos de investigación del

Tecnológico Nacional de México en la convocatoria 2024, proyecto número (IT16A236).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Eduardo, G. B. (2008). *-compilador C CCS y simulador Proteus para microcontroladores*. Mexico: Alfaomega.
- [2] Eduardo, G. B. (2008). *-compilador C CCS y simulador Proteus para microcontroladores*. Mexico: Alfaomega.
- [3] Howard, A. (1994). *Introducción al Álgebra Lineal*. Mexico: Limusa.
- [4] John, J. C. (2006). *Robotica*. Mexico: Prentice Hall.
- [5] Larson, H. (1993). *Larson*. Mexico: Mc Graw Hill.
- [6] Lovine, J. (2002). *ROBOTS ANDROIDS AND ANIMATRONICS*. Mexico City: McGraw-Hill.
- [7] Lozano Equisoain, D. (2022). *Arduino Practico*. Mexico: Anaya Multimedia.
- [8] Luis, A. B. (2017). *Enfoque practico de la teoria de los robots*. Madrid: UPC .
- [9] Mellado Arteche, M. (2009). *Robotica*. Valencia: Limusa.
- [10] Méndez Guzmán Hugo Antonio, M. T. (2023). Sistema IoT para monitoreo y control de irrigación. *Kaisen y Mecatronica* , 39-51.
- [11] Nazar Plata, A. ,. (2023). Análisis cinemático del andar de un robot hexápodo. *Congreso Estudiantil de Inteligencia Artificial Aplicada a la Ingeniería y Tecnología, UNAM, FESC, Estado de México, 2023* , 44-46.
- [12] Ollero Baturone, A. (2005). *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Madrid España: Marcombo.
- [13] Peter, C. (2023). *Robotic's Vision and Control*. Madrid: Springer.
- [14] Reyes Cortes, F. (2015). *Arduino aplicaciones en Robotica Mecatronica e Ingenierias*. Mexico: Alfaomega.

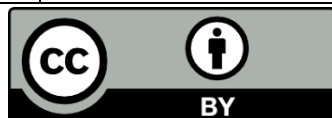
[15] Schmidt, D. (Argentina). *Electrónica con MicroPython*. 2024: Firtec Argentina.

[16] Subir, K. S. (2010). *Introducción a la Robotica*. Mexico: Mc. Graw Hill.

[17] Torrente Artero, O. (2013). *Arduino Curso practico de programación*. Madrid España: Alfa Omega Grupo Editorial.

Tabla de Rol Contribución

Rol	Autor(es)
Conceptualización	Carlos Enrique Maciel García
Metodología	Carlos Enrique Maciel García- José María Hernández Ochoa
Administración del proyecto	Favio Rey Lua Madrigal
Validación	Luis Enrique Salvador Cano – Favio Rey Lua Madrigal
Redacción	Luis Enrique Salvador Cano
Escritura- Revisión- Edición	Salvador Cano Luis Enrique, Maciel García Carlos Enrique, Hernández Ochoa José María, Lua Madrigal Favio Rey
Software	Luis Enrique Salvador Cano



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.