

Tipo de artículo: Artículo original
Temática: Robótica educativa
Recibido: 10/08/19 | Aceptado: 10/11/19 | Publicado: 22/11/19

DidaPlat: Plataforma robótica de bajo costo con 3 GDL para fines educativos.

DidaPlat: Low cost Robotic platform with 3 DOF for educational proposes.

Leonardo Navarro Noa^{1*}, Julio Javier Avalos García²

¹Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP), Universidad Central Marta Abreu de las Villas (UCLV). Carretera de camajuany Km 51/2. lenavarro@uclv.cu

²Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP), Universidad Central Marta Abreu de las Villas (UCLV). Carretera de camajuany Km 51/2. javalos@uclv.cu

* Autor para correspondencia: lenavarro@uclv.cu

Resumen

El avance tecnológico y el desarrollo en el campo de la robótica han hecho de los robots un factor indispensable para el progreso de la humanidad y su propia educación. En tal sentido esta investigación presenta la creación de un prototipo de robot paralelo de tres grados de libertad que pueda ser empleado como medio de enseñanza, con un enfoque de bajo costo y la posibilidad de seguimiento de trayectorias. El robot es diseñado teniendo en cuenta las tendencias actuales presentes en la literatura especializada, demostrándose la novedad del tema. Por otro lado, se obtienen las ecuaciones de la cinemática inversa del robot creado que son validadas tras realizar las pruebas experimentales. El hardware que forma parte del control del robot, así como del procesamiento de los datos, cumple satisfactoriamente con los requisitos que exige el sistema desarrollado. La interfaz creada para el manejo del robot posee tres modos: Automático, Manual y Trayectorias Preprogramadas, que permiten operar la plataforma de diferentes formas. Las pruebas experimentales se desarrollaron para cada uno de los modos de operación y se validaron por medio de la medición del alabeo y el cabeceo a través de una Unidad de Medición Inercial.

Palabras clave: *robot paralelo, robótica educativa, cinemática inversa, bajo costo, seguimiento de trayectorias*

Abstract

Technological progress and development in the field of robotics have made robots an indispensable factor for the progress of humanity and their own education. This research presents the creation of a three-degree parallel robot prototype that can be used as a teaching medium, with a low-cost approach and the possibility of trajectory tracking. The robot is designed taking into account current trends in specialized literature, demonstrating the novelty of the subject. On the other hand, the equations of the inverse kinematics of the created robot that are validated after the experimental tests are obtained. The hardware that is part of the robot's control, as well as the data processing,

satisfactorily meets the requirements demanded by the developed system. The interface created for handling the robot has three modes: Automatic, Manual and Preprogrammed Trajectory, which allow the platform to operate in different ways. Experimental tests were developed for each of the modes of operation and were validated by measuring the warping and pitching through an Inertial Measurement Unit.

Keywords: parallel robot, educational robotics, reverse kinematics, low cost, trajectory tracking

Introducción

Los robots paralelos, también conocidos como Mecanismos de Cinemática, son estructuras que presentan un buen rendimiento respecto a precisión, rigidez y habilidad de manipular objetos de gran peso (Merlet, 2006). El estudio de estas estructuras robóticas paralelas implica grandes retos en los que se enmarcan la dificultad de obtener la cinemática directa y la dinámica inversa al compararlos con los robots de cadenas cinemáticas abiertas (Casas *et al.*, 2017); por otro lado los mecanismos paralelos presentan singularidades con una mayor complejidad a la hora de obtenerlas. Respecto al espacio de trabajo estos robots están más restringidos que sus homólogos los robots serie, pues su naturaleza de cinemática cerrada acentúa esta limitación.

Aunque los robots de cadena cinemática abierta son más utilizados que los paralelos, estos últimos presentan características ideales para trabajos que serían imposibles para los primeros: mover cargas pesadas con gran precisión como radares y telescopios; además sirven para posicionar efectores finales en máquinas herramientas, realizar cirugía médica asistida, rehabilitación de articulaciones en pacientes, simuladores de vuelo y simuladores de movimiento (Avalos, 2010; Izaguirre, 2012).

De lo anteriormente expuesto resulta innegable la necesidad del estudio de los robots para el desarrollo industrial del país. En el mundo hay numerosas investigaciones que sustentan el estudio de robots y su diseño como una herramienta de enseñanza-aprendizaje (siendo de bajo costo) para los estudiantes de ingeniería a fines con el campo de la robótica. Meritorio de ello es el caso del robot móvil creado en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia llamado DARO destinado a ser una herramienta de fácil construcción y aprendizaje de la robótica (Adonayt, Jiménez y Hernández, 2017). Por otro lado, en (Pérula *et al.*, 2015) también se desarrolla un robot móvil educativo.

Se destaca el trabajo (Souza *et al.*, 2016) donde se diseña y desarrolla un brazo robótico inalámbrico con propósitos educativos. El robot desarrollado está basado en un Arduino modelo Yun, con servomotores y estructura impresa en 3D. Además, los autores desarrollan una interfaz gráfica creada en Processing a través de la cual se controla el robot.

Debido a su mayor divulgación y su menor complejidad de estudio, la implementación de robots series como medios de enseñanza se ha visto en ventaja con respecto a los robots paralelos. La capacidad que tienen los mecanismos series de manipular objetos como si fuese un brazo humano le da un mayor atractivo a estos robots, por lo que profesores y alumnos se ven más motivados a implementarlos. Según Imme (Ebert-Uphoff, 2003) el concepto de los manipuladores paralelos es inherentemente abstracto y su modelado cinemático no es muy intuitivo. Este autor agrega que los robots paralelos son un tema muy complejo de enseñar y en particular para estudiantes de pregrado. En su artículo Imme plantea que según su experiencia impartiendo Robótica en la universidad Georgia Tech, muchos de los estudiantes tienen problemas para comprender los conceptos de los robots paralelos y no les gusta estudiar las complejas ecuaciones de la cinemática sin tener demostraciones prácticas de sus significados. Por lo anterior, el propio autor en su trabajo desarrolla dos prototipos de manipuladores para motivar al estudiantado, en un primer lugar un robot de cinemática plana 3-RRR y posteriormente un robot Delta. Ambos robots fueron construidos con piezas de bajo costo, así como servomotores de modelismo y algunos bloques estructurales *LEGO*.

En la literatura se encuentran numerosos trabajos que se enmarcan en la construcción de robots paralelos como medios didácticos como son los trabajos (Riaño, Peña y Pardo, 2012), (Contreras *et al.*, 2011) y (Castillo, Vázquez y González, 2012).

Materiales y métodos

Demostrada la necesidad del desarrollo de un robot paralelo como medio de enseñanza en nuestras universidades, se implementó una estructura paralela de 3 Grados de libertad (GDL) al cual se le atribuyó el nombre *DidaPlat*.

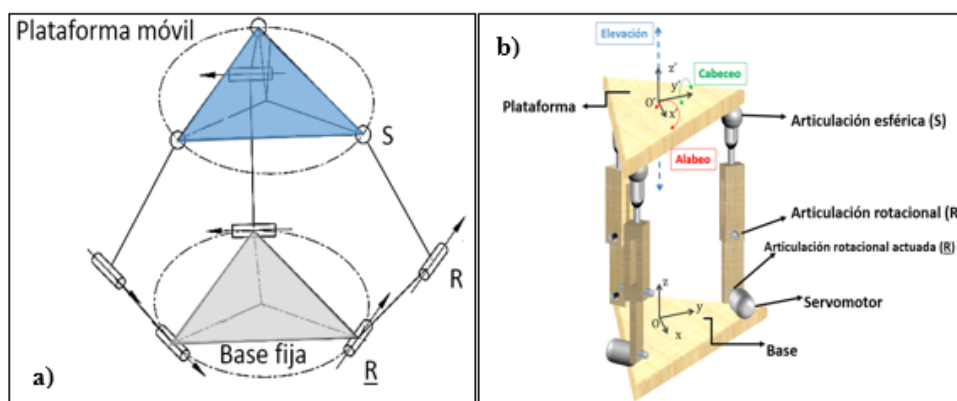


Figura 1. Estructura (a) y diseño (b) del robot *DidaPlat*

DidaPlat presenta una arquitectura 3-RRS como el analizado en (Tetik *et al.*, 2016), compuesto por tres cadenas cinemáticas idénticas del tipo: Rotacional actuada (R) anclada a la base fija, Rotacional pasiva (R) y Esférica pasiva (S) anclada a la plataforma móvil; que van en tal sentido desde la base fija hasta la plataforma móvil.

En la figura 1 b), se presenta el diseño del robot implementado, donde se aprecian las principales partes que lo componen. La arquitectura de este robot permite que en su efector final (plataforma) se puedan desarrollar rotaciones en x' (alabeo) y rotaciones en y' (cabeceo), además de trasladarse sobre el eje z' (elevación).

El robot está formado por tres cadenas cinemáticas paralelas las que están compuestas por una estructura como la de la figura 2 a). La base forma un triángulo equilátero con el eje de los servomotores, su centro de masa ubicado en el punto O , coincide con el centro del círculo circunscrito de radio r , que pasa por todos sus vértices, como se muestra en la figura 2 b). El radio r del círculo es igual a 43 mm de donde se obtiene que cada lado del triángulo equilátero es igual a 74.48 mm aproximadamente. Respecto a las dimensiones de la plataforma móvil esta es idéntica a la de la base, siendo también un triángulo equilátero con iguales dimensiones que su homóloga.

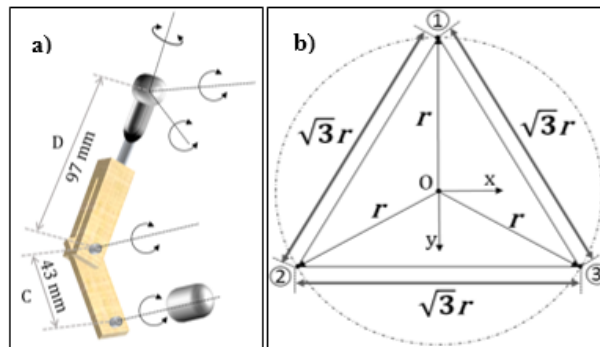


Figura 2. Dimensiones de las cadenas cinemáticas (a) y de la plataforma y la base (b) del robot *DidaPlat*

Modelo cinemático inverso

A través de las propiedades del cálculo vectorial, específicamente con el método poligonal, se puede obtener la siguiente ecuación en donde se relacionan los vectores de la estructura robótica (Izaguirre, 2012).

$$\vec{b}_i + \vec{l}_i = \vec{T} + \vec{p}_i \quad (1.1)$$

Despejando \vec{l}_i y llevando \vec{p}_i al sistema de referencia fijo multiplicándolo por la matriz de rotación ${}^B R_P$ queda:

$$\vec{l}_i = \vec{T} + {}^B R_P \vec{p}_i - \vec{b}_i \quad (1.2)$$

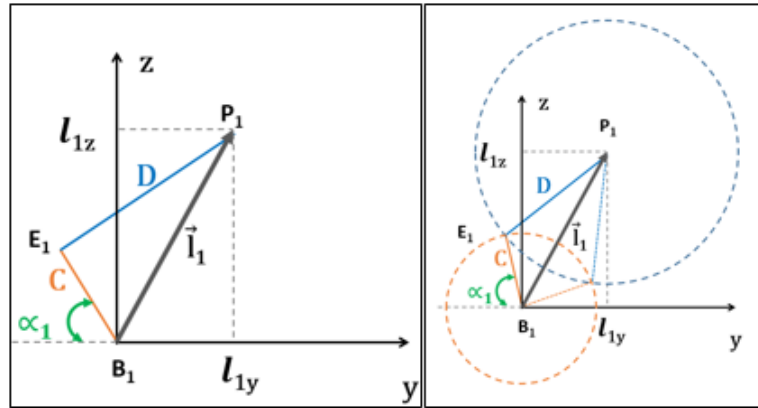


Figura 3. Obtención del modelo de la cinemática inversa

A partir del análisis de la figura 3 se obtiene una ecuación cuadrática en función de las coordenadas de la intersección de las circunferencias en y .

$$\left(1 + \frac{l_{1y}^2}{l_{1z}^2}\right)y^2 - \left(2K \frac{l_{1y}}{l_{1z}}\right)y + K^2 - C^2 = 0 \quad (1.6)$$

Donde la constante K es:

$$K = \frac{l_{1y}^2 + l_{1z}^2 + C^2 - D^2}{2l_{1z}} \quad (1.7)$$

De 1.6 se obtienen 2 soluciones que representan las dos intersecciones de las circunferencias (ver figura 3), en dicho caso se escoge la que es negativa convenientemente. Por otro lado, puede ser que la ecuación no tenga solución o la misma sea imaginaria y eso es cuando l_1 tiene una longitud tal que las circunferencias no se pueden intersectar. Luego de obtener las coordenadas del vector l_1 en el plano y se puede obtener el ángulo del servomotor correspondiente α_1 .

$$\alpha_1 = \cos^{-1}\left(\frac{E_{1y}}{C}\right) \quad (1.8)$$

Con la ecuación 1.8 queda resuelto el problema cinemático inverso del robot bajo estudio, de una manera sencilla y ligera para implementar en los medios de cómputo con los que se dispone.

Hardware

En la figura 4 se muestra la esquemática de las conexiones del hardware empleado para controlar al robot desarrollado. Se puede apreciar el uso del joystick y el potenciómetro como elementos de entrada manual en el robot. Por otro lado se tiene conectado en uno de los puertos de comunicación I²C a la IMU MPU6050 para poder medir las posiciones angulares de cabeceo y alabeo. También se muestran las conexiones de los tres servomotores a los pines digitales con capacidad de modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). Como microcontrolador se emplea el ESP32 modelo *Heltec Wifi-Lora 32 V2.0*.

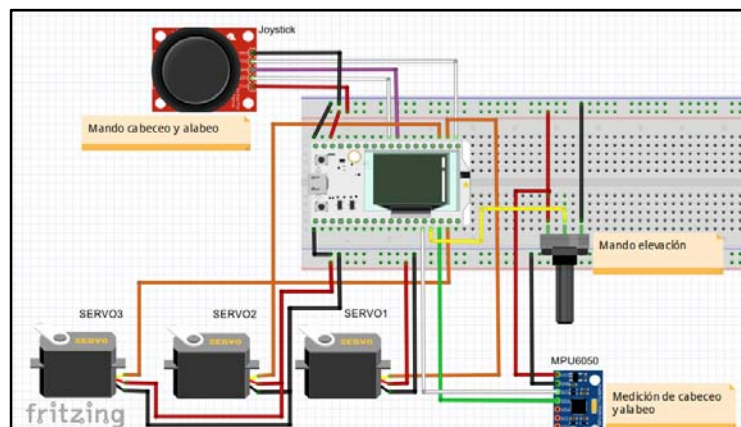


Figura 4. Diagrama de conexiones empleado para efectuar el control de DidaPlat

Resultados y discusión

Con el fin de demostrar la funcionalidad del robot DidaPlat y evaluar su desempeño, se efectuaron experimentos en donde al robot se le da la tarea de cumplir con trayectos. Se contarán con las mediciones de los giroscopios de la IMU como una forma de evaluar la precisión de la plataforma robótica. Los giroscopios solo permiten evaluar los movimientos de cabeceo y alabeo. Debido a que no se cuenta con su respectivo sensor, en este trabajo no se puede medir la elevación. Sin embargo, midiendo la precisión de la orientación se puede deducir la calidad del posicionamiento de la plataforma en la elevación.

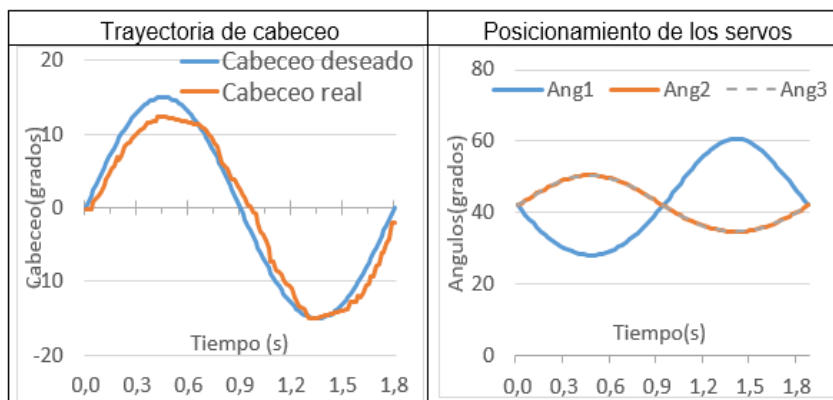


Figura 5. Resultados: trayectoria preprogramada (cabeceo)

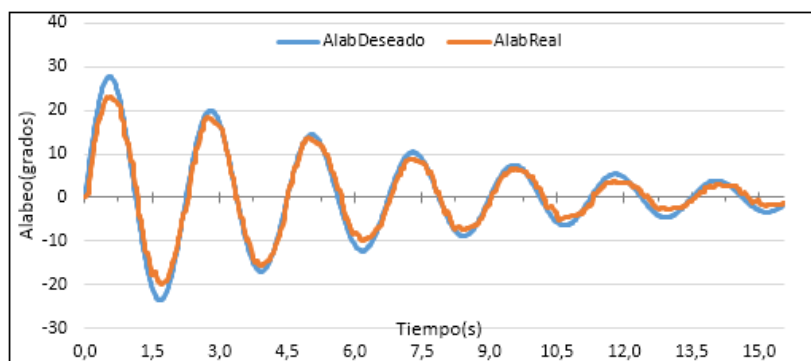


Figura 6: Trayectoria sinusoidal con amortiguamiento

Conclusiones

En el presente trabajo se obtuvo como resultado principal el desarrollo de un robot paralelo de 3 GDL de bajo costo con posibilidad de seguimiento de trayectoria. Mediante pruebas experimentales queda comprobada la utilidad del robot, el cual por sus características puede ser empleado por profesores y alumnos en clases vinculadas con la rama de la robótica y la automática. El análisis realizado del marco teórico arrojó que los robots paralelos son ampliamente empleados como medio de enseñanza, destacándose el empleo de robots de bajo precio como respuesta al elevado costo que presentan otros en el mercado. El mecanismo paralelo construido, por su simplicidad estructural, puede ser replicable, lo que favorece el proceso de enseñanza, pues un solo robot no basta para un grupo de alrededor de 30 estudiantes. El modelo de la cinemática inversa obtenido para el robot en cuestión representa satisfactoriamente su

comportamiento, esto se logra verificar experimentalmente a través de las mediciones de la IMU. Los componentes de hardware empleados cumplen satisfactoriamente con su función, a pesar de ser comerciales. La tarjeta de desarrollo utilizada realiza todas las funciones necesarias sin ningún inconveniente. Mediante las pruebas experimentales se pudo comprobar la versatilidad del prototipo creado el cual posee buena precisión y repetibilidad, llegando a tener como promedio errores de menos de tres grados tanto para alabeo como para cabeceo en todos los experimentos realizados.

Referencias

- Adonayt, I., Jiménez, F. R. y Hernández, Ó. M. (2017) «Robot Daro : plataforma robótica para educación en ingeniería», *Ingenium*, 18(35), pp. 58-74.
- Avalos, J. J. (2010) *Esquema de Control por Modelo Dinámico Inverso Simplificado para Simulador de Conducción de Dos Grados de Libertad*. Universidad Central Martha Abreu de las Villas.
- Casas, S. *et al.* (2017) «Optimization of 3-DOF parallel motion devices for low-cost vehicle simulators», *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 11(2), pp. 1-17. doi: 10.1299/jamdsm.2017jamdsm0023.
- Castillo, E., Vázquez, A. O. y González, A. (2012) «Desarrollo del Robot Paralelo Parallax LKF-240», *Ingenio Magno*, 3(2), pp. 48-57.
- Contreras, A. *et al.* (2011) «Simulación , Control y Construcción de un Robot Paralelo de 5 Barras y 6 GDL para Propósitos Didácticos», en *10mo Congreso Nacional de Mecatrónica*. Jalisco, México, pp. 220-225.
- Ebert-Uphoff, I. (2003) «Introducing Parallel Manipulators Through Laboratory Experiments», en *IEEE Robotics and Automation Magazine*. Georgia, Estados Unidos, pp. 13-19.
- Izaguirre, E. (2012) *Control cinemático en el espacio de tareas de robot paralelo neumático en aplicación de simulador de movimiento*. Universidad Central «Marta Abreu» De Las Villas.
- Merlet, J. P. (2006) *Parallel Robots*. 2da ed. Editado por G. M. Gladwell. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Pérula, R. *et al.* (2015) «Developing Educational Printable Robots to Motivate University Students Using Open Source Technologies», *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 81(1), pp. 25-39. doi: 10.1007/s10846-015-0205-3.
- Riaño, C., Peña, C. y Pardo, A. (2012) «Approach in the Optimal Development of Parallel Robot for

Educational Applications.», en *Recent Advances in Intelligent Control, Modelling and Simulation Approach*. Pamplona, Colombia, pp. 145-150.

Souza, M. R. S. B. *et al.* (2016) «Design, Manufacture and Construction of a Wireless Robotic Arm for Educational Purposes», en *Proceedings - 12th LARS Latin American Robotics Symposium and 3rd SBR Brazilian Robotics Symposium*. Uberlândia, Brasil, pp. 376-380. doi: 10.1109/LARS-SBR.2015.68.

Tetik, H. *et al.* (2016) «Position Kinematics of a 3-RRS Parallel Manipulator», en *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures*. Springer International Publishing, pp. 65-72. doi: 10.1007/978-3-319-33714-2_8.