

Capítulo 1 Robot Móvil Omnidireccional con manipulador de 4 grados de libertad

Chapter 1 Omnidirectional Mobile Robot with 4 degrees of freedom manipulator

VÁZQUEZ-GARCÍA, Ernesto, GUDIÑO-LAU, Jorge†*, MARTÍNEZ-VALENCIA, Héctor y HERNÁNDEZ-BARÓN, Eduardo

Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica, Km. 20.5 Carretera Manzanillo-Barra de Navidad, El Naranjo, Manzanillo, Colima. C.P. 28860

ID 1^{er} Autor: *Ernesto, Vázquez-García* / **ORC ID:** 0000-0002-1405-2675

ID 1^{er} Coautor: *Jorge, Gudiño-Lau* / **ORC ID:** 0000-0002-0585-908X

ID 2^{do} Coautor: *Héctor, Martínez-Valencia* / **ORC ID:** 0000-0001-8790-3955

ID 3^{er} Coautor: *Eduardo, Hernández-Barón* / **ORC ID:** 0000-0001-5600-0075

DOI: 10.35429/H.2021.10.1.22

E. Vázquez, J. Gudiño, H. Martínez y E. Hernández

*jglau@ucol.mx

J. Gudiño, E. Hernández, S. Charre, J. Alcalá y M. Duran (AA. VV.). Proyectos de Ingeniería Aplicada, Ciencia y Tecnología ©ECORFAN- México, 2021.

Abstract

The present thesis presents the analysis, design, manufacture, and control of an omnidirectional robot with a 4 degrees of freedom robotic arm, which is used as an open architecture control module in the Electromechanical Engineering Faculty of the University of Colima, so that the students apply their knowledge about control, robotics, instrumentation, automation, and teleoperation. The robot has the optimal qualities for students to send and receive signals easily through a connection board. In addition, a lineal control applied to the omnidirectional robot is described in detail, using a mobile application, through which students can control the movements of both the omnidirectional robot and the 4 degrees of freedom robotic arm, and observe their response through graphs.

Robot, Omnidirectional, Mobile, Control and manufacture

Resumen

En el presente documento se expone el análisis, diseño, manufactura y control de un robot omnidireccional con brazo robótico articulado de 4 grados de libertad, mismo que se utiliza como un módulo de control de arquitectura abierta en la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima, con el fin de que los estudiantes apliquen sus conocimientos en control, robótica, instrumentación, automatización y teleoperación. El robot posee las cualidades adecuadas para que los estudiantes envíen y reciban señales de manera sencilla a través de una tablilla de conexiones. Además, se describe de forma detallada un control lineal aplicado al robot omnidireccional, utilizando una aplicación móvil, mediante la cual los alumnos pueden controlar los movimientos del carro omnidireccional, así como del brazo robótico de 4 grados de libertad y observar su respuesta en gráficas.

Robot, Omnidireccional, Móvil, Control y manufactura

1. Introducción

El aumento de estudiantes por estudiar el área de Ingeniería Mecatrónica o Ingeniería en Robótica ha ocasionado una gran demanda del uso de equipos especializados y de vanguardia; así como módulos didácticos para el aprendizaje práctico de los estudiantes en diferentes ramas de la ingeniería como mecatrónica, teoría de control, control moderno, control digital, control inteligente, robótica, programación, instrumentación virtual, automatización, entre otras.

Así mismo, la adquisición de equipos robóticos móviles didácticos es difícil debido a sus precios elevados. Uno de los robots móviles para educación e investigación más reconocido es desarrollado por la empresa KUKA® en el 2010, con el robot manipulador industrial de 5 grados de libertad más una pinza mecánica, el robot está montado sobre una plataforma móvil omnidireccional; el sistema completo es conocido como youBot®, como se muestra en la Figura 1. La plataforma móvil omnidireccional tiene la capacidad de montar y desmontar el robot manipulador, además tiene la capacidad de soportar dos manipuladores. El youBot® posee interfaces completamente abiertas y permite a los desarrolladores entrar al sistema en todos los niveles de control de hardware (Alers, *et al*, 2014, Rivero, 2021, Sharma *et al*, 2012, Aitken *et al*, 2016).

Aunado a lo anterior, son pocas las dependencias de Educación Superior en México que no tiene módulos robóticos móviles y además no tienen robots manipuladores en arquitectura abierta, lo que dificulta a los alumnos el aprendizaje de las áreas que comprenden la mecatrónica, otro inconveniente que se tiene que no se puede aplicar cualquier algoritmo de control en robots manipuladores o móviles. Por todo lo anterior, el robot móvil tipo omnidireccional con brazo robótico de 4 grados de libertad presentado en este trabajo, es una opción de bajo costo para resolver los inconvenientes presentados anteriormente (Wenqiang, *et al*, 2019, Zdešar, *et al*, 2017, Mirelez, *et al*, 2015, Ribas-Xirgo, *et al*, 2014).

Figura 1 KUKA youBot – robot móvil omnidireccional



Fuente de Consulta: (Sharma et al, 2012)

El robot móvil tipo omnidireccional con brazo robótico de 4 grados de libertad presentado en este trabajo funciona como módulo práctico para los estudiantes de las áreas de ingeniería, quienes pueden utilizarlo como una plataforma móvil manipuladora de objetos, capaz de desplazarse en todos los sentidos (omnidireccional) y que, gracias a su arquitectura abierta, se le puede aplicar cualquier algoritmo de control. Las entradas y salidas del robot son utilizadas de manera sencilla gracias a una tablilla de conexiones que se conectan al robot de manera alámbrica.

Este trabajo está distribuido de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se describe una introducción a los robots móviles omnidireccionales, así como el objetivo y la justificación del proyecto, en el Capítulo 2 muestra los fundamentos de los robots móviles, características y sus aplicaciones; en el Capítulo 3 se describe el diseño mecánico del robot, el análisis cinemático directo e inverso del brazo robot, así como su validación en SolidWorks® y Matlab®; la construcción de la plataforma móvil, las características del prototipo y las configuraciones de las llantas del robot móvil omnidireccional; son mostrados en el Capítulo 4, los resultados experimentales y una descripción del funcionamiento del prototipo son descritos en el Capítulo 5; en el Capítulo 6 y 7 se presentan los agradecimientos y las conclusiones y el trabajo futuro, respectivamente.

2. Fundamentos de los robots móviles

Los robots móviles más representativa de acuerdo con su sistema de locomoción son: con ruedas/cintas de desplazamiento (diferencial, síncrona, triciclo, ackerman, omnidireccionales y orugas) y con patas (bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, etc.) (Barrientos, 2007, Barrientos, *et al* 2007a, Barrientos, *et al* 2007b, Ollero, 2001)

La decisión de qué tipo de locomoción utilizar depende de varios factores como lo son: la maniobrabilidad (facilidad en el manejo del robot), controlabilidad (relacionada con las posibles trayectorias que el robot pueda seguir), tracción (tipo de suelo), capacidad de subir pendientes, estabilidad (estabilidad estática y dinámica), eficiencia (tracción vs consumo), mantenimiento y alimentación (batería, gasolina, etc.) e impacto ambiental (motores eléctricos, motores de gasolina, etc.).

En la locomoción de tipo ruedas/cintas de desplazamiento, se pueden encontrar los siguientes tipos:

Ackerman: es un sistema simple de 4 ruedas: las dos traseras se montan de forma paralela en el chasis principal del vehículo, mientras que las ruedas delanteras son del tipo direccionamiento, y se utilizan para seguir la trayectoria del robot, como se observa en la Figura 2a. Es muy sencillo de implementar, sin embargo, el mayor problema de este tipo de locomoción es su limitación en la maniobrabilidad.

Triciclo tiene buena estabilidad y es mecánicamente más simple que otros tipos de locomoción. La rueda direccional no es motriz (puede ser una rueda loca), y no es necesario controlar la velocidad de las ruedas para que el robot se mantenga recto, ver la Figura 2b.

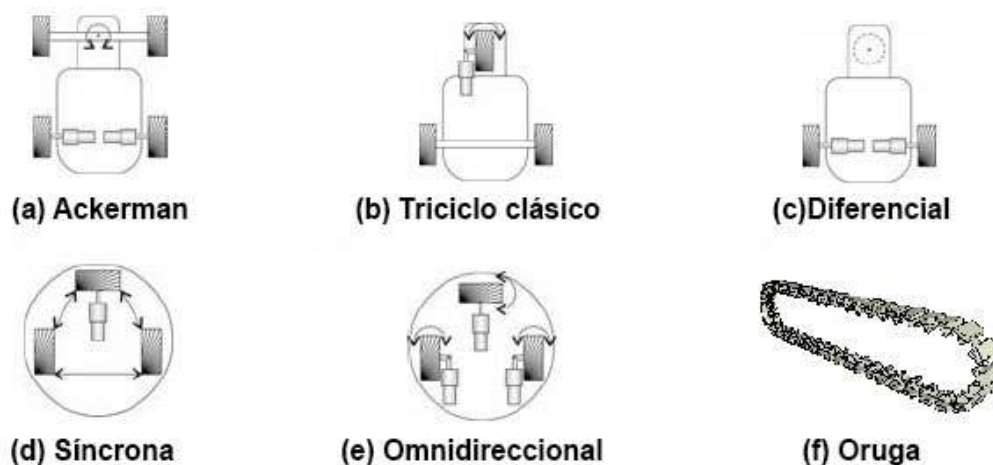
Diferencial, es uno de los menos complicados (dentro de la perspectiva de la programación y de la construcción). El robot puede ir recto, girar sobre sí mismo y trazar curvas, como se muestra en la Figura 2c. Sin embargo, posee varias desventajas: el equilibrio del robot se debe dar mediante un apoyo adicional mediante una o dos ruedas de apoyo, además requiere un control de precisión para trayectorias rectas.

Síncrona es una locomoción compuesta normalmente de 3 ruedas, cuyo diseño es complejo y de difícil implementación, sin embargo, supera muchas de las dificultades que presentan otros tipos de locomoción, como se observa en la Figura 2d. La separación de los motores para traslación y rotación simplifica el control. Además, el control en línea recta está garantizado mecánicamente.

Omnidireccional este tipo de locomoción requiere de llantas especiales que permiten movimientos complicados (reduciendo restricciones cinemáticas). Sin embargo, el movimiento en línea recta no está garantizada (es necesario aplicar un controlador), como se muestra en la Figura 2e.

Oruga es un sistema sencillo de controlar, utilizando cintas de desplazamiento para realizar sus movimientos, ver la Figura 2f. Sin embargo, no dispone de un modelo matemático preciso de giro, además de que consume demasiada energía para realizar esta acción (Márquez, *et al* 2014, Barrientos, *et al* 2007a, Barrientos, *et al* 2007b, Ortigoza, *et al* 2007)

Figura 2 Tipos de locomoción en robots móviles



Fuente de Consulta: (Barrientos et al, 2007b)

Por otro lado, la locomoción de tipo patas tiene la ventaja de poder moverse por cualquier terreno que un ser humano pueda. Sin embargo, tienen varios inconvenientes, ya que poseen muchos grados de libertad y por lo tanto son difíciles de controlar. Además, mantener su estabilidad es complicado y su consumo de energía es alto. Los más comunes son los bípedos, un ejemplo de ellos es el ASIMO® (acrónimo del inglés Advanced Step in Innovative Mobility, paso avanzado en movilidad innovadora), como se observa en la Figura 3 (Shimegi, 2019).

Figura 3 Robot móvil con patas



Fuente de Consulta: (Shigemi, 2019)

Existe varias aplicaciones robot móvil, en este apartado se realiza de acuerdo con el medio en el que los robots móviles se desplacen:

Terrestres, se utilizan en rastreo y traslado de objetos, evasión de obstáculos, traslado de instrumental quirúrgico en hospitales, limpieza del área del hogar, ambientes cooperativos y en la industria donde se emplean para análisis e inspección de fisuras en gaseoductos y contenedores de petróleo, como se observa en la Figura 4.

Marinos como los submarinos equipados con sensores especiales para navegación dentro del agua como sonar, radar, visión telescópica, giroscopio, ver Figura 5.

Aéreos pueden proporcionar imágenes aéreas para reconocimiento de terreno y superficie, y son muy útiles en problemas de análisis de tráfico e inspección de edificios, como se muestra en la Figura 6 (Bolton, 2010, Reyes, 2013).

Figura 4 Robot móvil terrestre



Fuente de Consulta: (García et al, 2019)

Figura 5 Robot móvil marino.



Fuente de Consulta: (Peña, 2018)

Figura 6 Ejemplo de robot móvil aéreo.



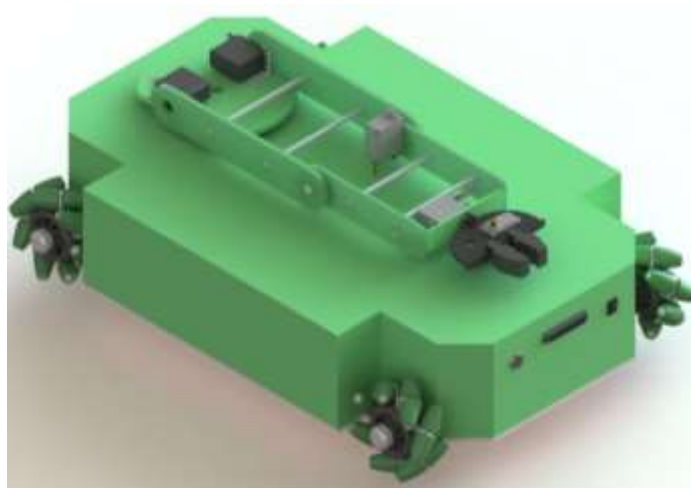
Fuente de Consulta: (Ruírez, 2016)

3. Diseño en CAD y el análisis cinemático

3.1. Diseño en CAD

El prototipo es diseñado en el software CAD Solidworks® como se observa en la Figura 7. Se pueden apreciar las 2 partes principales del robot: el chasis móvil, que tiene con 4 ruedas omnidireccionales, y el brazo robótico de 4 grados de libertad, que utiliza una pinza como efector final.

Figura 7 Vista isométrica del robot



Las dimensiones del chasis omnidireccional se observan en la Figura 8 una vista de planta y en la Figura 9 una vista lateral; todo está dado en cm. En general, el robot móvil mide 56 cm de largo y 32 cm de ancho y 14 cm de alto.

Figura 8 Acote real de la plataforma móvil en cm

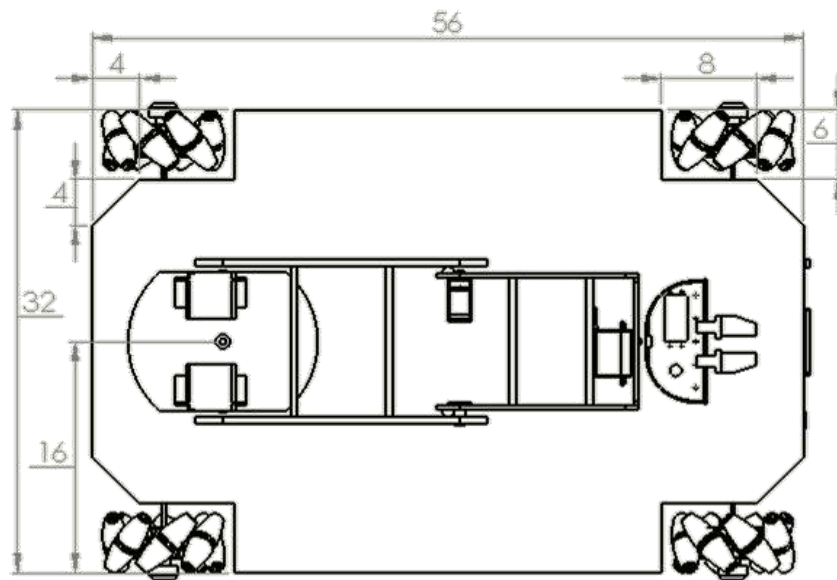
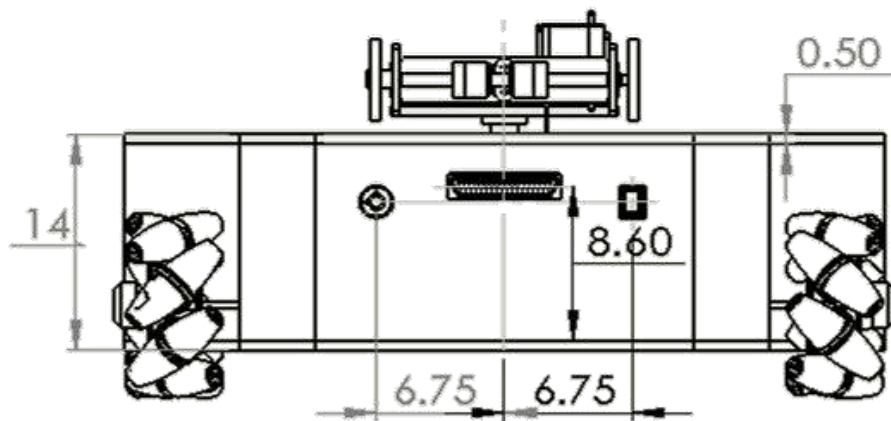


Figura 9 Acote real de la plataforma móvil en cm



Las dimensiones del brazo robótico se observan en la Figura 10 (largo de cada eslabón) y en la Figura 11 (ancho de los eslabones). Posee una longitud en extensión de aproximadamente 50 cm.

Figura 10 Acote real de los eslabones del brazo robótico en cm

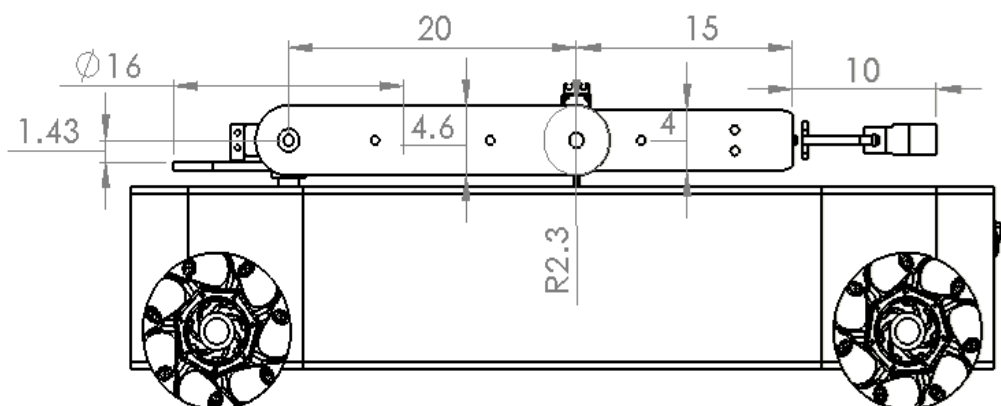
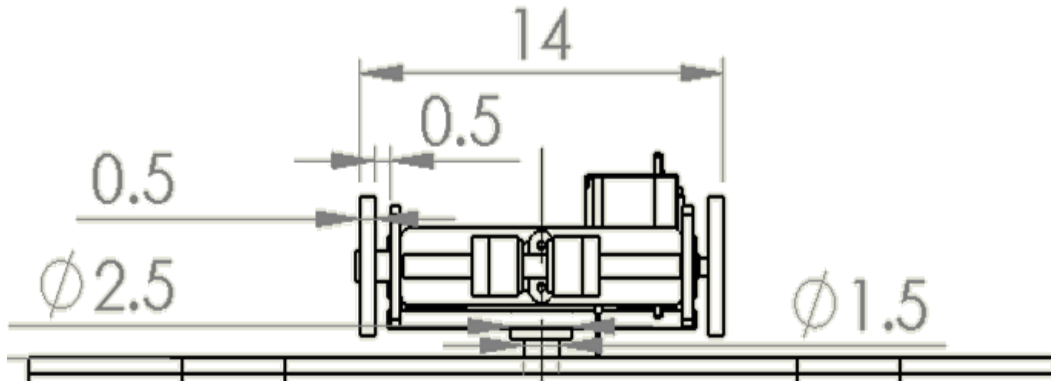


Figura 11 Acote real del ancho del brazo robótico en cm



3.2. Análisis cinemático directo del robot

Para el análisis cinemático directo se apoya del algoritmo de Denavit-Hartenberg que determinan los sistemas de referencia enlazados a cada articulación en base a los ejes de giro para cada eslabón como se observa en la Figura 12 y los parámetros D-H son mostrados en la Tabla 1 y en la Tabla 2 describe las medidas del robot en centímetros (Barrientos, 2007, Fu *et al*, 1987, Reyes, 2020, Sheng *et al*, 2017, Spong *et al*, 1989).

Figura 12 Ejes de coordenadas del brazo robótico

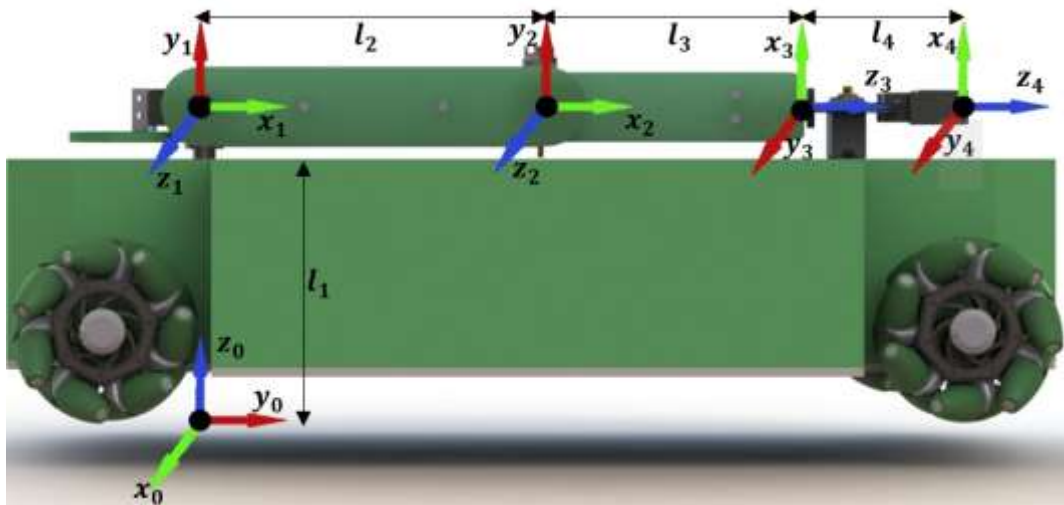


Tabla 1 Parámetros de Denavit-Hartenberg

Articulación i	θ_i	α_i	d_i	a_i
1	θ_1+90°	90°	L_1	0
2	θ_2	0	0	L_2
3	θ_3+90°	90°	0	0
4	θ_4	0	0	L_3+L_4

Se obtiene la matriz de transformación homogénea para robots manipuladores está dada por la ecuación (1).

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Tabla 2 Medidas de los eslabones del brazo robótico

Elemento	Longitud (cm)
L ₁	17.65
L ₂	20
L ₃	15
L ₄	10

Las matrices de transformación para cada eslabón se obtienen de sustituir los valores de las Tablas 1 y 2 en la matriz de transformación, ecuación (1).

Para la primera articulación, que corresponde a la cintura, se tiene:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + 90^\circ) & 0 & \sin(\theta_1 + 90^\circ) & 0 \\ \sin(\theta_1 + 90^\circ) & 0 & -\cos(\theta_1 + 90^\circ) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \ell_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

El hombro es representado por la segunda articulación:

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & \ell_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & \ell_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para la tercera articulación que corresponde al codo, es:

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3 + 90^\circ) & 0 & \sin(\theta_3 + 90^\circ) & 0 \\ \sin(\theta_3 + 90^\circ) & 0 & -\cos(\theta_3 + 90^\circ) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Y por último la cuarta articulación, corresponde al movimiento de la muñeca:

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ell_3 + \ell_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

La transformación homogénea final del brazo robótico articulado se obtiene efectuando el producto de las matrices de cada articulación, mediante la ecuación (6)

$${}^0A_4 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 \quad (6)$$

El resultado de efectuar la multiplicación se presenta la posición del efector final expresada en el sistema global que se encuentra en la base del robot, ver ecuación (7)

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} s\theta_1 c\theta_4 s\theta_{23} + c\theta_1 s\theta_4 & c\theta_1 c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_4 s\theta_{23} & -s\theta_1 c\theta_{23} & -(\ell_3 + \ell_4) s\theta_1 c\theta_{23} - \ell_2 s\theta_1 c\theta_2 \\ s\theta_1 s\theta_4 - c\theta_1 c\theta_4 s\theta_{23} & s\theta_1 c\theta_4 + c\theta_1 s\theta_4 s\theta_{23} & c\theta_1 c\theta_{23} & (\ell_3 + \ell_4) c\theta_1 c\theta_{23} + \ell_2 c\theta_1 c\theta_2 \\ c\theta_4 c\theta_{23} & -s\theta_4 c\theta_{23} & s\theta_{23} & \ell_1 + (\ell_3 + \ell_4) s\theta_{23} + \ell_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde $s\theta_1 = \sin \theta_1$, $s\theta_2 = \sin \theta_2$, $s\theta_3 = \sin \theta_3$, $s\theta_4 = \sin \theta_4$, $c\theta_1 = \cos \theta_1$, $c\theta_2 = \cos \theta_2$, $c\theta_3 = \cos \theta_3$, $c\theta_4 = \cos \theta_4$, $s\theta_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ y $c\theta_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$

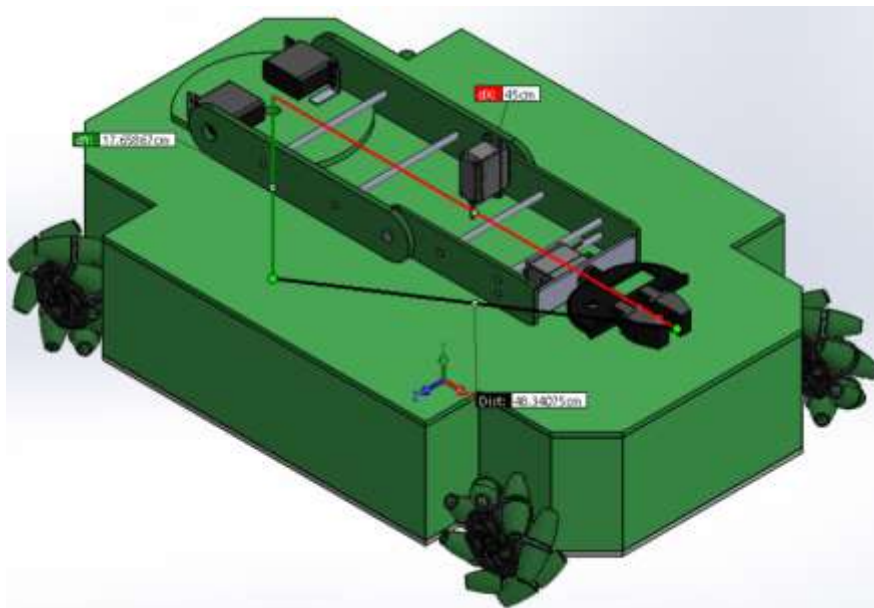
Con el propósito de validar la cinemática directa del robot se establecen 2 posiciones mediante coordenadas articulares, la primera se observa en la tabla 4.4 en la cual se tiene el robot en su posición inicial.

La validación experimental de la ecuación (7) que representa la posición cartesiana del efector final proyectada en el sistema de coordenadas base se muestra en la Figura 9, donde: $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$ y $\theta_4 = 0^\circ$. Al sustituir los valores en la matriz de transformación homogénea se tiene:

$${}^0A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 45 \\ 1 & 0 & 0 & 17.62 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Como se puede observar en la Figura 13, el resultado concuerda con los datos que se tienen en SolidWorks®, teniendo en cuenta el sistema de referencia base.

Figura 13 Vista isométrica del robot en posición inicial

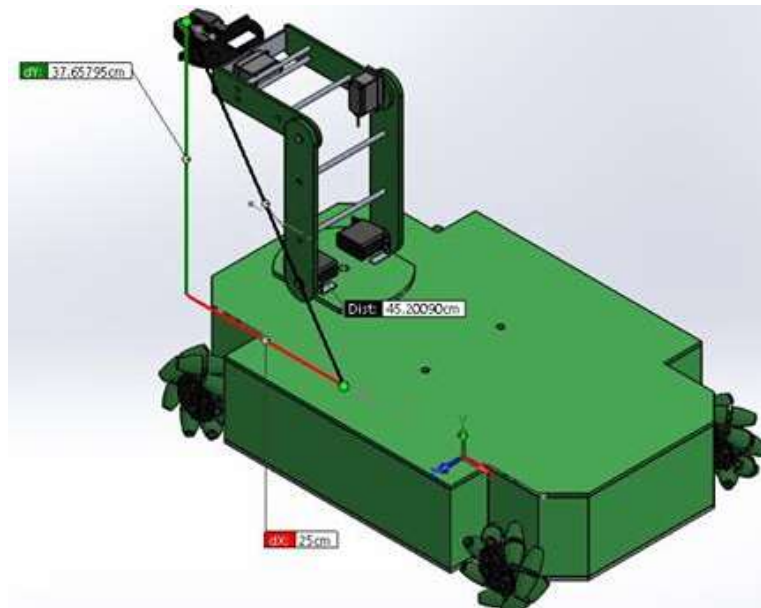


Para la segunda validación de la cinemática directa, se asignan los siguientes ángulos $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$ y $\theta_4 = 0^\circ$. Sustituyendo los valores en la matriz de transformación homogénea se tiene la siguiente matriz.

$${}^0A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 25 \\ -1 & 0 & 0 & 37.65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

En la Figura 14 se observa los valores obtenidos a partir de la matriz de transformación homogénea, en el eje Y (con respecto al sistema de referencia) se tiene un desplazamiento a de 25 cm hacia el eje negativo y en el eje Z se tiene una distancia de 37.65 cm.

Figura 14 Vista isométrica del robot para la segunda validación



3.3. Análisis cinemático inverso del robot

Las primeras 3 coordenadas articulares se obtienen mediante el método geométrico, la Figura 15 muestra la configuración del robot. El dato de partida son las coordenadas (P_x, P_y, P_z) en las que se quiere posicionar el efector final (Barrientos, *et al* 2007, Craig, 2007, Fu, *et al*, 1987, Kelly y Santibañez, 2003, Reyes 2019, Reyes, 2020, Spong, 1989). Para este análisis se tiene que $q_1 = \theta_1$, $q_2 = \theta_2$ y $q_3 = \theta_3$. El valor de q_1 se obtiene inmediatamente mediante la Ecuación 10.

$$q_1 = \arctan\left(\frac{-P_x}{P_y}\right) \quad (10)$$

Para el caso de la articulación 2 y 3 se tienen dos posibles configuraciones denominadas codo arriba y codo abajo; como se muestra en la Figura 15 y 16 respectivamente.

Figura 15. Configuración codo arriba

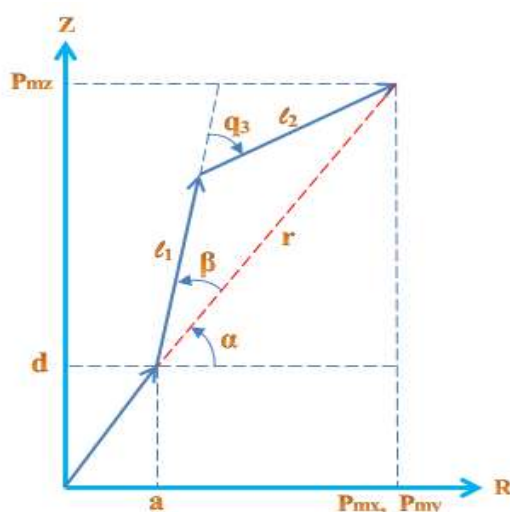
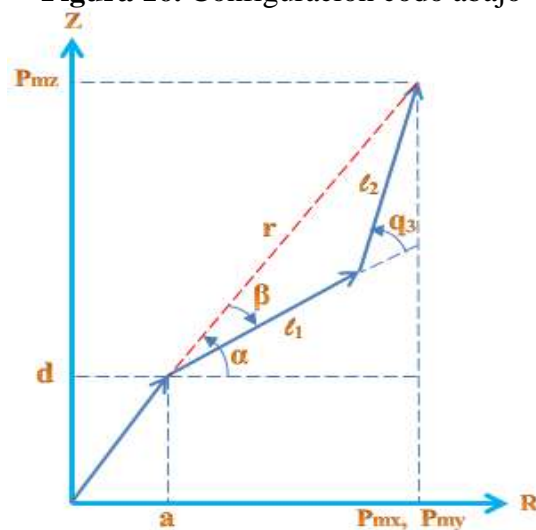


Figura 16. Configuración codo abajo



El robot únicamente presenta un desfase en el eje Z el cual está dado por la longitud de L_1 establecido en la Tabla 2. El vector que va desde el giro de la segunda articulación hasta el punto central de la muñeca el cual se puede observar en la Figura 13 está dado por la Ecuación 11.

$$r = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - d)^2} \quad (11)$$

Considerando ahora la articulación 2 y 3, que están situadas en el mismo plano y utilizando el teorema del coseno, se tiene la Ecuación 12.

$$r^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos(q_3) \quad (12)$$

Despejando el $\cos(q_3)$ de la expresión anterior, se obtiene la Ecuación 13.

$$\cos(q_3) = \frac{r^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (13)$$

Por último, se despeja la articulación q_3 al aplicar arcoseno a ambos lados de la ecuación, obteniendo el valor de q_3 tal y como se observa en la Ecuación 14.

$$q_3 = \arccos\left(\frac{r^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}\right) \quad (14)$$

Para el cálculo de q_2 se obtiene que el ángulo α está dada por la Ecuación 15

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}\right) \quad (15)$$

y para el cálculo de β se tiene la Ecuación 16

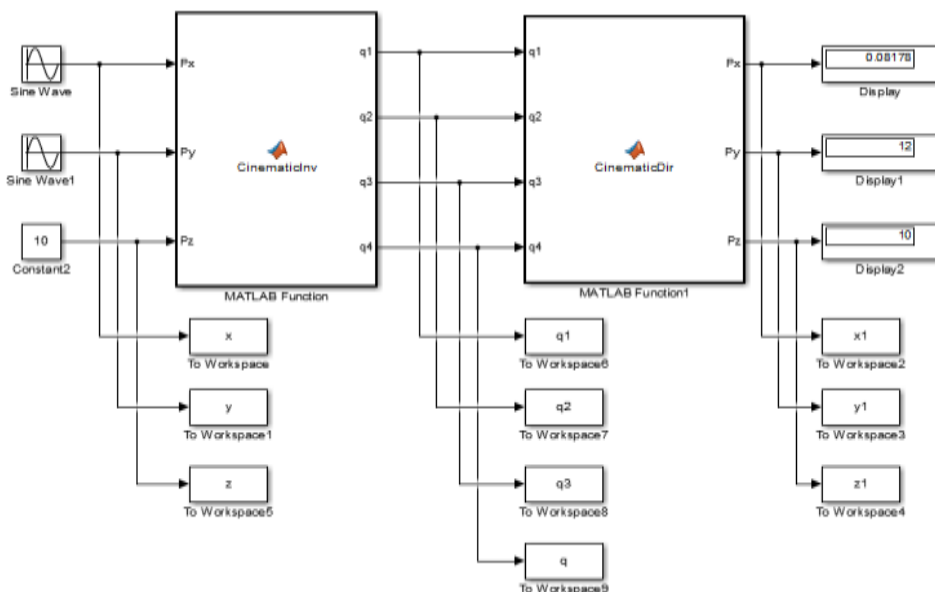
$$\beta = \arctan\left(\frac{Pmz - d}{\sqrt{Pmx^2 + Pmy^2}}\right) \quad (16)$$

por lo tanto

$$q_2 = \alpha - \beta \quad (16)$$

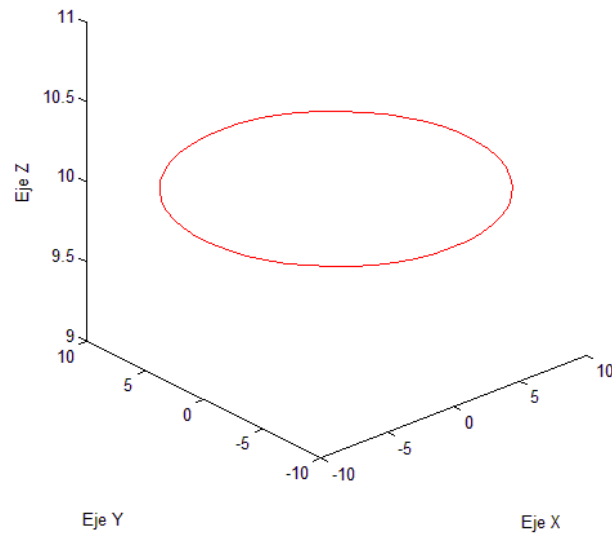
Con la finalidad de comprobar la cinemática inversa se realiza un modelo en Simulink® como se observa en la Figura 17, en el cual se gráfica un círculo. Los datos del círculo entran a la función de la cinemática inversa cuya salida entra a la función de la cinemática directa el cual retornará los datos de la posición cartesiana.

Figura 17 Modelo en Simulink® para validar la cinemática inversa del robot



En la Figura 18 se puede observar el círculo resultante el cual tiene un diámetro de 10 cm y se encuentra formado entre el eje “X” y “Y”; dejando fijo el eje “Z”.

Figura 18 Círculo mediante la cinemática inversa y directa en Matlab®



Por lo que se garantiza que la cinemática directa e inversa funciona correctamente, al realizar el círculo en el espacio de trabajo del robot manipulador.

4. Construcción del robot omnidireccional

En esta sección se muestra el diseño mecánico y las partes que conforman el robot móvil omnidireccional; así como los movimientos de cada llanta para tener un desplazamiento del mismo.

4.1. Robot omnidireccional

Las medidas del diseño del robot son detalladas en el Capítulo 3, el robot tiene 4 llantas omnidireccionales de 14 cm de diámetro como se observa en la Figura 19, ubicadas en las esquinas del robot, asegurándose que los rodillos de las llantas en diagonal apunten a la misma dirección. Las paredes del chasis miden 12 cm de alto, con el objetivo de que la batería y la transmisión se instalen sin problemas de altura. La superficie del robot omnidireccional es la única que se acopla mediante tornillos, pues es removible por si algún actuador o sensor llega a dañarse.

Figura 19 Vista general del chasis omnidireccional



4.1.1 Tableta de conexiones

La tableta de conexiones es un conector macho DB37 es la responsable de la transmisión de datos a la tablilla de conexiones de los actuadores, sensores y electrónica de potencia, la ubicación de la tablilla se encuentra en la pared trasera del robot omnidireccional, como se observa en la Figura 20, así mismo, existe un interruptor ON/OFF para encender y apagar el robot omnidireccional. Además, tiene un interruptor de llave, que permite al usuario cambiar de arquitectura abierta (adquisición de datos por medio de la tablilla de conexiones) a arquitectura cerrada (uso del robot mediante aplicación móvil diseñada para dispositivos Android).

Figura 20 Tablero de la parte trasera del robot omnidireccional



4.2 Brazo robótico

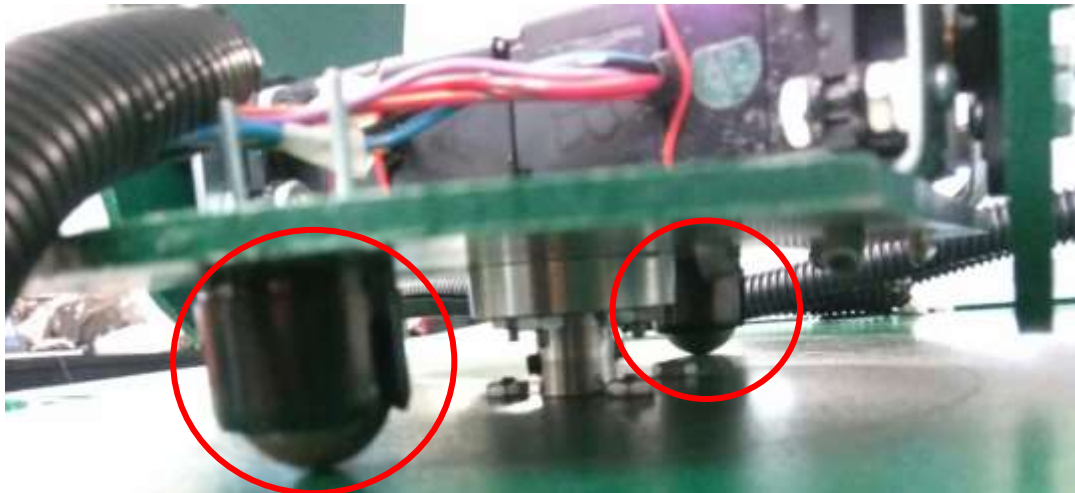
Los eslabones del brazo robótico se maquinan en una fresadora universal y se acoplaron a los motores. La primera articulación que representa la cintura del robot tiene un motor encargado de rotar el brazo robótico y es el único que se encuentra dentro del chasis y se acopla al brazo mediante una transmisión mecánica. La segunda articulación tiene 2 servomotores SCR PRO S8466 colocados en el hombro del robot, los servomotores sostienen a los eslabones. La tercera articulación que representa el codo del robot, se mueve mediante un servomotor igual al del hombro, a diferencia de la segunda articulación, solo un eslabón es accionado mediante un motor, el segundo tiene un movimiento pasivo gracias al acople de aluminio. La cuarta articulación es la muñeca y se mueve mediante un servomotor MG995, que acopla al efector final, se encarga de rotar la pinza que actúa como efector final mide 105 mm de largo, 100 mm de alto y 30 mm de ancho. Es accionado por un servomotor y tiene una apertura máxima de 5 cm, ver Figura 21.

Figura 21 Vista general del brazo robótico



Además, tiene dos ruedas locas, como se observa en la Figura 22, en la base del brazo robótico para disminuir el esfuerzo del motor de la primera articulación para girar el brazo.

Figura 22 Ruedas locas



4.3 Transmisión del robot

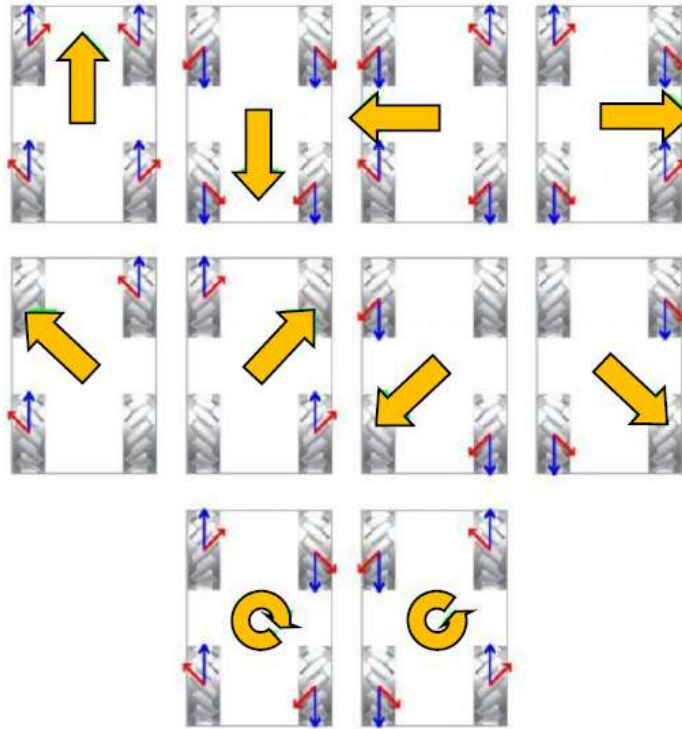
Una vista general de la transmisión del brazo robótico montada en el chasis del robot es mostrada en la Figura 23. Los engranes son de aluminio y utilizan ejes de acero inoxidable de 6 mm de diámetro, están acoplados con opresores de 1/8" de diámetro por 1/4" de largo. Los ejes son sostenidos mediante rodamientos de 6 mm de diámetro interno y 19 mm de diámetro externo, los cuales son acoplados a la base del robot mediante portabalero de aluminio y tornillos NF de 1/8" de diámetro por 1" de largo. El motor gira a 127 rpm en voltaje máximo, pero debido a que se alimenta con 9.7 V (debido a la caída de voltaje del puente H), la velocidad angular del motor es de aproximadamente 102 rpm, por lo tanto, la velocidad angular después de la transmisión es de aproximadamente 25 rpm (Shigley, 2001).

Figura 23 Transmisión montada en el chasis



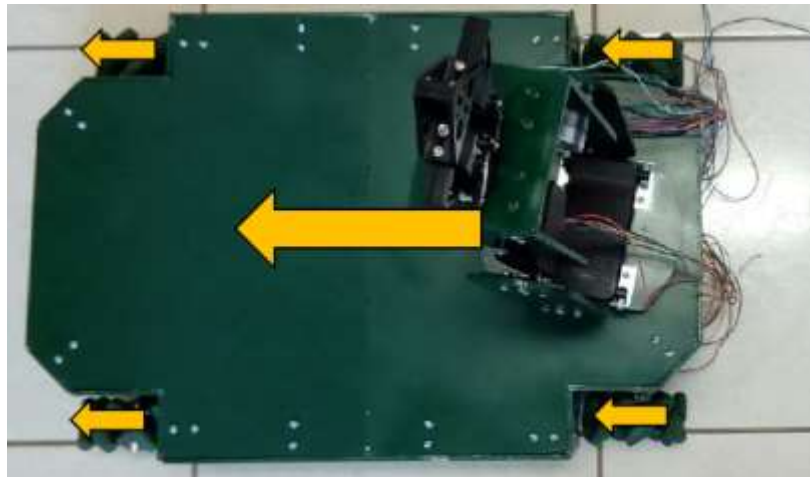
4.4 Movimientos del robot omnidireccional

El robot omnidireccional puede realizar un total de 10 movimientos: adelante, atrás, izquierda, derecha, diagonal superior izquierda, diagonal superior derecha, diagonal inferior izquierda, diagonal inferior derecha, giro horario y giro antihorario. Para realizar cada uno de dichos movimientos se debe tener una configuración específica del movimiento de las llantas omnidireccionales, la cual se puede observar en la Figura 24 (Adamov, 2018, Campos, 2018, Changlong *et al*, 2019, Wang *et al*, 2018, Zhang *et al*, 2013).

Figura 24 Movimientos de llantas omnidireccionales

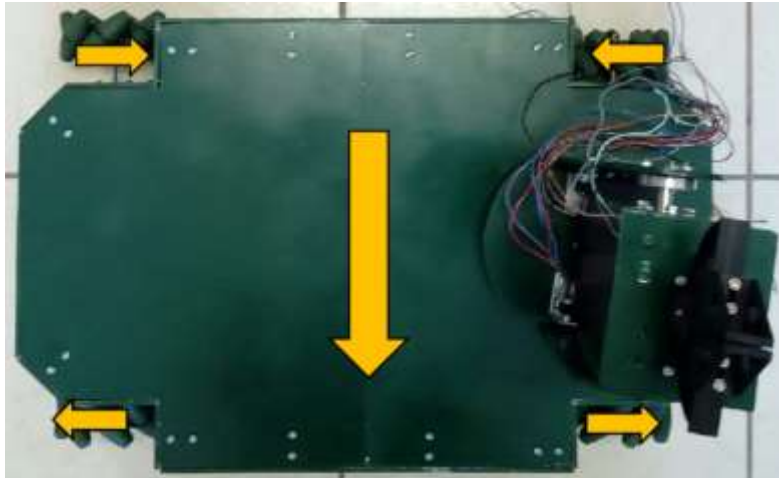
Fuente de Consulta: (Campos, 2018)

Las llantas omnidireccionales vienen en pares iguales (y no 4 idénticas). Para cumplir con los movimientos dados en la Figura 25 las llantas con los rodillos a 45° del eje Y en sentido horario deberán colocarse en el motor superior izquierdo y el motor inferior derecho. Las dos llantas restantes (con los rodillos a 45° del eje Y en sentido antihorario) deben colocarse en el motor superior derecho y el motor inferior izquierdo.

Figura 25 Movimiento hacia atrás del robot

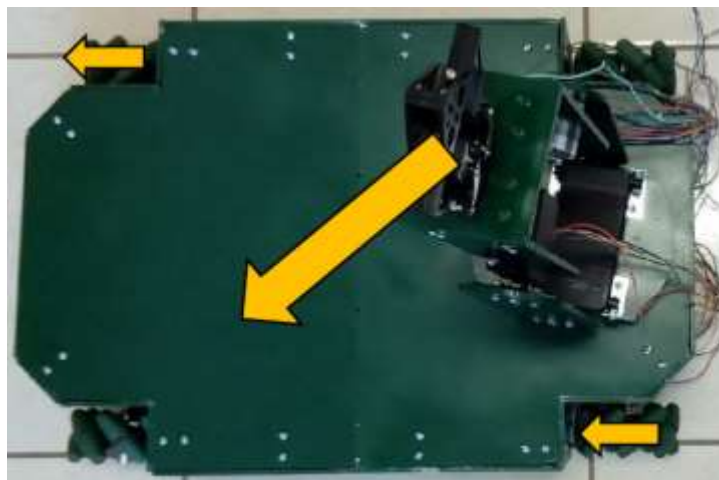
Para mover el robot en movimientos hacia adelante y hacia atrás, las 4 llantas omnidireccionales deben girar en el mismo sentido. En la Figura 24 se observa un ejemplo del robot moviéndose hacia atrás y la dirección que deben tener las llantas. Para mover el robot lateralmente, los pares de llantas omnidireccionales en diagonal deben moverse en la dirección opuesta. Por ejemplo, si desea mover el robot hacia la derecha (como en la Figura 26) las llantas superior izquierda e inferior derecha deberán girar hacia atrás, mientras las llantas superior derecha e inferior izquierda deberán girar hacia adelante.

Figura 26 Movimiento hacia la derecha del robot



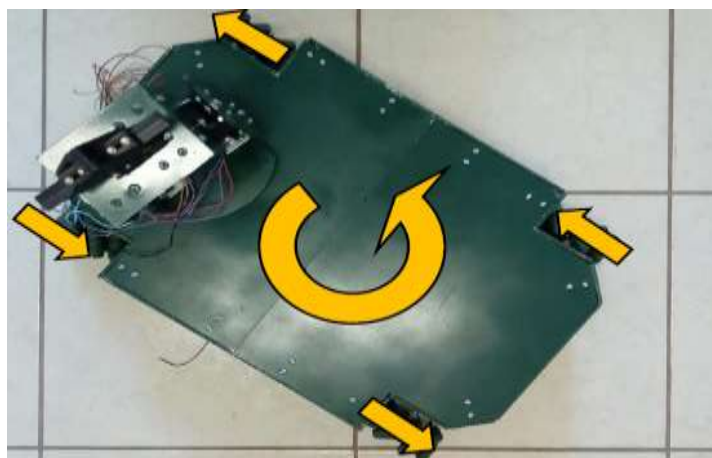
En la Figura 27 se muestra el movimiento del robot omnidireccional en forma diagonalmente, solo un par de llantas en diagonal son activadas (girando al mismo sentido). Es decir, si se desea mover el robot en diagonal inferior derecha como se observa en la Figura 28, las llantas superior derecha e inferior izquierda deben girar hacia atrás.

Figura 27. Movimiento en diagonal inferior derecha del robot



Para que el robot omnidireccional gire sobre su eje, las llantas de la derecha deberán girar al mismo sentido y las llantas de la izquierda al sentido contrario. Es decir, si desea que el robot gire en sentido antihorario como se observa en la Figura 28, las llantas de la izquierda deberán girar hacia atrás y las llantas de la derecha hacia delante.

Figura 28 Rotación antihoraria del robot



5. Resultados experimentales

Los resultados experimentales son importantes para determinar que el diseño mecánico, eléctrico y el control funcionan correctamente, para ello se desarrolla una aplicación en App Inventor para dispositivos Android para controlar el robot omnidireccional, tanto la plataforma móvil como el brazo manipulador (Popov *et al*, 2019). Con la aplicación se envían datos por bluetooth (a través de un módulo de bluetooth HC-04 incorporado al robot) a un Arduino MEGA 2560, que controla el sentido de giro de los motores. El menú principal de la aplicación se observa en la Figura 29, el menú consta de 3 botones:

Carro: Entrar a la ventana para el control de la plataforma móvil omnidireccional.

Brazo: Entrar a la ventana para el control del brazo robótico de 4 grados de libertad.

Conectar/Desconectar: Activar o desactivar la conexión bluetooth con el celular.

Figura 29 Menú de la aplicación



Al dar clic en el botón de “Carro”, se abre una pantalla como se observa en la Figura 30 con botones en forma de flechas, con las cuales el usuario puede manipular los 10 movimientos que puede realizar el chasis omnidireccional, y si ningún botón se encuentra presionado, el robot automáticamente se detiene. El usuario puede además controlar la velocidad de la plataforma móvil mediante una barra de control ubicada en la parte superior de la ventana. Por otra parte, si el usuario desea salirse del control del chasis, deberá pulsar el botón de “regresar”, ubicado en la parte inferior de la ventana.

Al presionar del botón del “Brazo”, se abre un submenú donde muestra que el brazo puede moverse en coordenadas cartesianas o angulares como se puede observar en la Figura 31. La posición cartesiana: el usuario puede controlar el robot en coordenadas cartesianas x,y,z , aquí se aplica la cinemática inversa del robot y la posición angular: el usuario puede controlar cada una de las articulaciones del robot, aquí se emplea cinemática directa del robot.

Además, se puede controlar además la apertura y el cierre de la pinza, de 0% al 100%. Los valores de la posición se pueden escribir y a través de botones con flechas aumentar o disminuir las posiciones sin la necesidad de escribirlos. Un solo pulso a las flechas da un avance de 1 unidad (milímetros para la cartesiana, y grados para la angular), mientras que, si se mantiene pulsado el botón de las flechas, da un avance de 10 unidades.

Figura 30 Menú para el control de la plataforma móvil



Figura 31 Menú para el control del brazo robótico



Una vez seleccionada la articulación que se desea manipular, muestra un submenú como se observa en la Figura 33, en esta ventana aparece la gráfica del robot manipulador que describe el valor real en color verde y mientras el deseado en color amarillo. Para el control de seguimiento de la trayectoria se aplica un algoritmo de control lineal PID con los siguientes parámetros: $K_p = 4.5$, $K_i = 0.5$ y $K_d = 0.02$; y como se observa en la gráfica de la Figura 32 comparando la señal deseada contra la real de la primera articulación tiene un buen seguimiento lo que garantiza que las ganancias del algoritmo de control son correctas (Kuo, 1996, Ogata, 2010), esto mismo se realiza para las demás articulaciones teniendo resultados similares. Uno de los inconvenientes, al estar en tiempo real la función de graficar consume muchos recursos del teléfono, se puede deshabilitar al desmarcar la casilla a lado de la palabra “Graficar”. Por último, si el usuario desea salirse del control del brazo, deberá pulsar el botón de “regresar”, ubicado en la parte inferior de la ventana.

Figura 32 Menú graficar articulaciones del brazo robótico



6. Agradecimiento

Los autores del capítulo del libro agradecen a la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima por otorgar todas las facilidades para realizar este proyecto de investigación y prestar sus laboratorios y talleres.

7. Conclusiones

El robot móvil omnidireccional es diseñado para utilizarse como una plataforma de arquitectura abierta en el que los usuarios puedan aplicar los diferentes algoritmos de control como clásico, difuso, inteligente, adaptable, robusto, entre otros. Además, puede servir para la enseñanza de la mecatrónica, mecánica, dinámica, instrumentación, visión, automatización, robótica, instrumentación, entre muchos más. El robot móvil omnidireccional es diseñado y construido en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima y lo más importante es de bajo costo, que si bien el precio final de los materiales y mano de obra es de aproximadamente 25,000 pesos mexicanos, es considerablemente menor a otros robots omnidireccionales en el mercado, como el youBot® de KUKA® con un precio en el mercado de 25,000 euros.

Por otra parte, se concluye que el análisis, diseño, manufactura y control de un robot omnidireccional con brazo robótico articulado de 4 grados de libertad, es validado mediante un algoritmo de control lineal con buenos resultados. Además, el robot una tablilla de conexiones para que los usuarios envíen y reciban señales de manera sencilla.

Son pocas las Universidades del País que tiene robots móviles omnidireccionales con un brazo robot, y que les permita aplicar diferentes algoritmos de control, por esta razón es importante este prototipo.

Como trabajo futuro es continuar con la mejora del prototipo robot móvil omnidireccional, es decir colocar una cámara de alta definición en el efector final del brazo robótico para que seleccione piezas de diferentes colores y formas para clasificar objetos; que son pocos los robots que tienen esta aplicación y se más atractivo este prototipo. En este mismo sentido, se espera controlar el robot móvil mediante visión para eso es necesario un juego de tres cámaras externas que garanticen las posiciones espaciales del robot móvil omnidireccional ya sea en el centro del robot móvil o en el efector final.

8. Referencias

- Aitken, J., McAree, O., Veres, S. (2016). Symbiotic relationship between robots — a ROS ARDrone/YouBot library. UKACC International Conference on Control (CONTROL).
- Adamov, B. I. (2018). Influence of mecanum wheels construction on accuracy of the omnidirectional platform navigation (on example of KUKA youBot robot). International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS).
- Alers, S., Claes, D., Fossel, J., Hennes, D., Tuyls, K, Weiss, G. (2014). How to Win RoboCup@Work? The Swarmlab@Work Approach Revealed. Book Lecture Notes in Computer Science.
- Barrientos, Antonio, Peñin, Luis Felipe, Balaguer, Carlos & Aracil, Rafael. (2007). Fundamentos de Robótica. España: McGraw Hill.
- Barrientos, A., Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., Rossi, C. (2007a). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. Grupo de cibernética, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Barrientos R., García, J., Silva, R. (2007b). Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte. Pulibits. Instituto Politécnico Nacional.
- Bolton, W. (2010). MECATRÓNICA: Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica (Cuarta ed.). México, D.F.: Marcombo.
- Changlong Ye, Jianhui Zhang, Suyang Yu, Guanglin Ding. (2019). Movement Performance Analysis of Mecanum Wheeled Omnidirectional Mobile Robot. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation.
- Craig, John J. (2003). Introduction to robotics: mechanical and control. (Third edition). USA: Prentice Hall.
- Fu, K. S., González, R. C. & Lee, C. S. G.. (1987). Robotics: control, sensing, vision and intelligence. USA: McGraw Hill.
- García, Nickson, Molina, Cristian. (2019). Desarrollo de un Robot Móvil Terrestre Semiautónomo con Acceso Remoto. Tesis Licenciatura. Universidad de Ibagué.
- Kelly Martínez, Rafael & Santibañez Davila, Victor. (2003). Control movimiento de robots manipuladores. Pearson Educación.
- Kuo, B. (1996). Sistemas de Control Automático. Cd. de México: Prentice Hall.
- Márquez, C., Silva, R., Marcelino, M., Cruz, M., Sosa, Y., García, J. (2014). Robots móviles de ruedas: generalidades. Boletín UPIITA. El camino de la innovación educativa. ISSN 2007-6150.
- Mirelez, F., Morales, A., Ríos, R. Pérez, H. (2015). Control Servovisual de un Kuka youBotr para la manipulación y traslado de objetos. Congreso Nacional de Control Automático, AMCA.
- Ogata. (2010). Ingeniería de Control Moderna. Cd. de México: Prentice-Hall.
- Ollero, A. (2001). ROBÓTICA. Manipuladores y robots móviles. Barcelona: MARCOMBO, S.A.
- Ortigoza, R., García, J., Barrientos, R, Molina, M. (2007). Una panorámica de los robots móviles. Revista Electrónica de Estudios Telemáticos. Vol. 6. No. 3.
- Peña, Antonio. (2018). Desarrollo de un diseño esquemático y conceptual de un vehículo submarino operado remotamente (ROV). Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana.

- Popov, V., Ahmed, S., Shakev, N., Topalov, A. (2018). Detection and Following of Moving Targets by an Indoor Mobile Robot using Microsoft Kinect and 2D Lidar Data. International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV).
- Reyes Cortés, Fernando. (2020). Robótica: Control de robots manipuladores. Alfaomega.
- Reyes Cortés, Fernando. (2019). MATLAB Aplicado a Robótica y Mecatrónica. Alfaomega
- Reyes Cortés, Fernando. (2013). Mecatrónica - Control y automatización. Cd. de México: Alfaomega.
- Ribas-Xirgo Lluís. (2014). A Virtual Laboratory of a Manufacturing Plant Operated with Mobile Robots. IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA).
- Rivero González, F. J. (2021). Simulación del robot KUKA YouBot en el entorno de CoppeliaSim. Tesis Licenciatura. Universidad de Sevilla. España.
- Ruírez, Pablo. (2016) Diseño y Fabricación de un Dron. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica de Valencia
- Sharma, S., Kraetzschmar, G., Rhein, B., Scheurer, C., Bischoff, R. (2012). Unified Closed Form Inverse Kinematics for the KUKA youBot. Robotik - Proceedings for the Conference of ROBOTICS.
- Sheng, W., Jingjin, S., Fengyu, X., Guoping, J. (2017). Kinematic accuracy analysis of robot based on local POE. IEEE.
- Shigemi, S. (2019) ASIMO and Humanoid Robot Research at Honda. In: Goswami A., Vadakkepat P. (eds) Humanoid Robotics: A Reference. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6046-2_9.
- Shigley, J. (2001). Análisis y Síntesis de Mecanismos. Cd. de México: Mc Graw Hill.
- Spong, Mark W. & Vidyasagar, M.. (1989). Robot dynamics and control. USA: John Wiley & Sons.
- Wang Jianbin, Chen Jianping. (2018). An Adaptive Sliding Mode Controller for Four-wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Input Constraints. Chinese Control And Decision Conference (CCDC).
- Wenqiang Chen, Chenguang Yang, Ying Feng. (2019). Shared Control For Omnidirectional Mobile Robots. Chinese Control And Decision Conference (CCDC).
- Zhang Liandong, Zhou Changjiu. (2013). Kuka youBot® Arm Shortest Path Planning Based on Geodesics. Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).
- Zdešar, Andrej, Blažic Sašo, Klančar, Gregor. (2017). Engineering Education in Wheeled Mobile Robotics. IFAC-Papers On Line Volume 50, Issue 1, Pages 12173-12178