



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

TRABAJO DE TITULACIÓN

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA, CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TEMA:

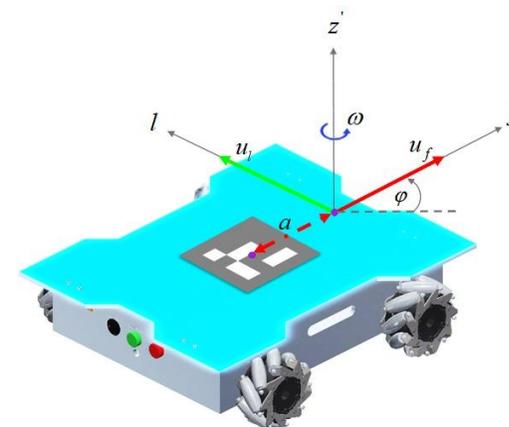
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA OMNIDIRECCIONAL PARA EVALUAR CONTROLADORES MODERNOS EN EL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA UTILIZANDO VISIÓN ARTIFICIAL

AUTOR:

RODRIGUEZ HIDALGO, JHON CARLOS

TUTOR:

ING. DARÍO MENDOZA



LATACUNGA 2021



CONTENIDO

RESUMEN

OBJETIVOS

DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO ELECTRÓNICO

PROGRAMACIÓN

PRUEBAS Y RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

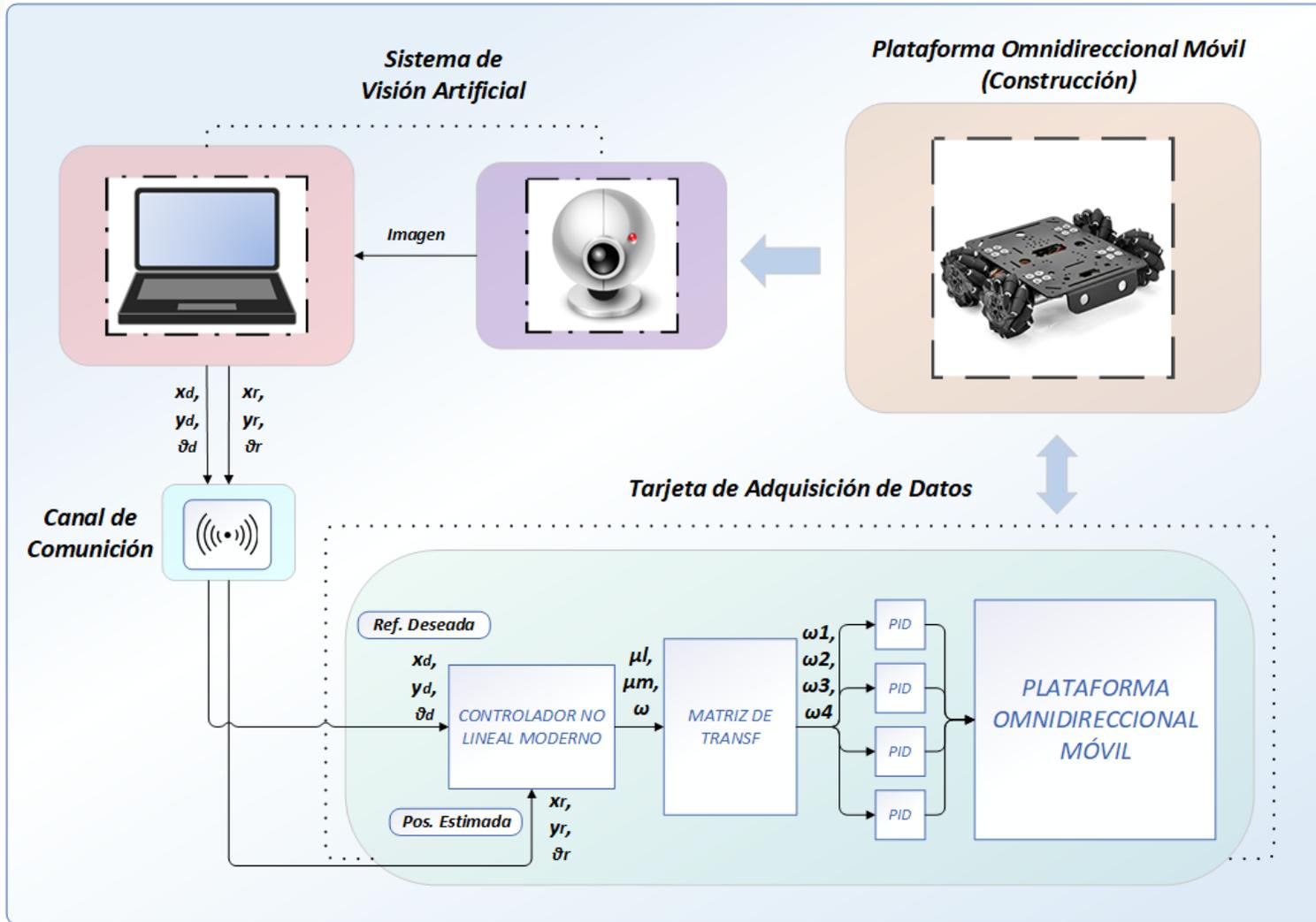


RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realiza el diseño y la construcción de una plataforma omnidireccional con el objetivo de evaluar la eficiencia y robustez de los algoritmos de control modernos en el seguimiento de trayectorias a través de la implementación de un sistema servovisual que permite la estimación de la POSE por medio de marcadores binarios ArUco disponibles en la librería de visión artificial OpenCV. Por medio de la investigación preliminar se optó por la configuración Mecanum debido a sus características destacadas frente a otras configuraciones. Los resultados obtenidos fueron contrastados con un algoritmo de control clásico en donde se evalúan las gráficas resultantes de las señales de control y de los errores de control, permitiendo así determinar si el sistema es estable, inestable o asintóticamente estable. El algoritmo de visión artificial fue implementado y compilado en el IDE Qtcreator, el cual hizo posible el desarrollo de una interfaz gráfica que permite al usuario mover la plataforma omnidireccional de forma manual, modificar los parámetros del sistema como son: el desfase del punto de operación tanto de posición como de orientación, seleccionar y configurar la trayectoria deseada, definir el tiempo de implementación del seguimiento de trayectoria, escoger el controlador que se desea implementar, modificar la matriz de ganancia y de peso de los controladores modernos, ubicar el punto de origen del sistema de referencia, visualizar la posición y orientación actual del robot y por último ejecutar el control de trayectoria. Por último se realiza la validación de la hipótesis por medio la prueba del chi cuadrado el cual permitió afirmar que el sistema servovisual propuesto si permite la evaluación de eficiencia y robustez en el seguimiento de trayectorias.



CONTROL SERVO VISUAL



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir una plataforma omnidireccional para evaluar controladores modernos en el seguimiento de trayectoria utilizando visión artificial

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar acerca de las plataformas omnidireccionales móviles: tipos, variantes, componentes electrónicos y mecánicos; a través de fuentes bibliográficas para realizar un análisis y selección preliminar del tipo de configuración a implementar.
- Realizar el diseño mecánico y electrónico de la plataforma omnidireccional usando herramientas de diseño electrónico y CAD/CAE.



OBJETIVOS

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir la plataforma omnidireccional móvil mediante el análisis y el estudio previo realizado.
- Obtener el modelo matemático que describa el comportamiento de la plataforma omnidireccional móvil para evaluar la respuesta del sistema.
- Implementar el entorno servo visual a través del desarrollo de un algoritmo de visión artificial que permita estimar la POSE de la plataforma omnidireccional y a su vez evaluar la estabilidad de los datos obtenidos.
-



OBJETIVOS

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la eficiencia y robustez de 2 algoritmos de control MIMO avanzados en el seguimiento de trayectoria de la plataforma omnidireccional móvil con la finalidad de evaluar el comportamiento de los errores de control.
- Contrarrestar los resultados obtenidos a través algoritmos de control moderno con un algoritmo de control PID con el propósito de verificar la eficiencia de los algoritmos de control moderno frente a los algoritmos de control clásicos.



DISEÑO MECÁNICO

PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetros	Representación	Valor
Masa de la plataforma	m_p	10kg
Carga máxima	m_c	5kg
Velocidad lineal	\vec{V}_{req}	0.7 m / s
Factor de Carga	f	10%



DISEÑO MECÁNICO

SELECCIÓN DE COMPONENTES MECÁNICOS



Rueda Omnidireccional Mecanum 4 in

Característica	Valor
Diámetro	4 in
Capacidad de carga	200 lb / 90.9 kg por rueda
Peso	0.9 lb / 0.4 kg por rueda
Coeficiente delantero/inverso de fricción	0.7
Coeficiente lateral de fricción	0.6
Número de rodillos	9
Material interior del rodillo	nylon (blanco)
Material exterior del rodillo	TPU
Material Corporal Exterior	0.12 in. acero grueso, chapado en zinc
Material Corporal Interior	policarbonato negro moldeado



DISEÑO MECÁNICO

SELECCIÓN DE COMPONENTES MECÁNICOS



Motor CQRobot 70:1 37D 70L

Característica	Valor
Relación de marchas	70 : 1
Voltaje	12 V
Velocidad sin carga	157 RPM
Corriente sin carga	200 mA
Corriente de estancamiento	5.5 A
Par de parada	28 kg · cm ≈ 2.75 N · m
Par continuo recomendado	15 kg · cm ≈ 1.47 N · m
Tensión de funcionamiento del codificador	3.3V – 20V
Tipo de codificador	Hall (tipo incremental)
Resolución del codificador	64 CPR
Tamaño	37D * 70L mm
Peso	235 g

DISEÑO MECÁNICO

SELECCIÓN DE COMPONENTES MECÁNICOS



Tarjeta de Desarrollo STM32 Nucleo-F446RE

Característica	Valor
Microcontrolador	<i>STM32 en paquete LQFP64</i>
Núcleo del CPU	<i>Arm Cortex – M4 core</i>
Frecuencia máxima	<i>180 MHz</i>
Potencia de Consumo	<i>345 mW</i>
Memoria	<i>512 Kbytes de memoria Flash 128 Kbytes de SRAM</i>
ADC	<i>3 convertidores A/D de 12 bits con 24 Canales</i>
E/S Digitales	<i>114 puertos de E / S con Capacidad de Interrupción</i>
Temporizadores	<i>17 Timers 32bits, 2x watchdog, 1x SysTick timer</i>
Interfaces de Comunicación	<i>4 USART, 4 I²C , 4 SPI, 2 SAI, 2 CAN</i>
Depurador/programador	<i>ST – LINK a bordo, USB almacenamiento masivo</i>



DISEÑO MECÁNICO

SELECCIÓN DE COMPONENTES MECÁNICOS

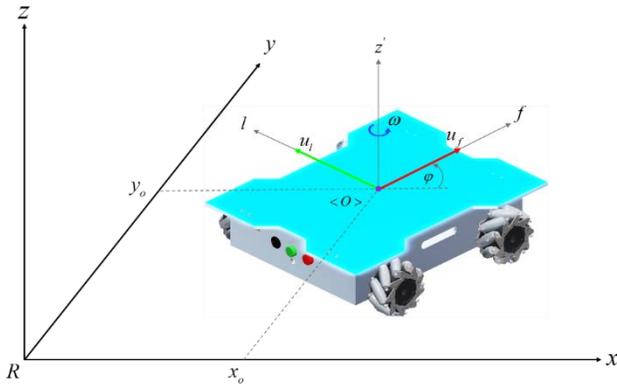


XBEE Pro S2C

Característica	Valor
Voltaje de alimentación	2.7V – 3.6V
Rango en interiores	90m
Rango en exteriores	3200m
Potencia	63mW
Interfaz de datos serie	UART / SPI
Protocolo	IEEE 802.15.4
Dimensiones	2.199 x 3.4 x 0.305 cm

MODELO CINEMÁTICO

Representación Esquemática de la Plataforma Omnidireccional



$$\dot{x}_o = u_f \cos(\varphi) - u_l \sin(\varphi)$$

$$\dot{y}_o = u_f \sin(\varphi) + u_l \cos(\varphi)$$

$$\dot{\varphi} = \omega$$

Donde:

\dot{x}_o, \dot{y}_o : Velocidad lineal en x e y respectivamente, del centro de la plataforma $\langle O \rangle$.

u_l, u_f : Velocidad lateral y frontal respectivamente, del centro de la plataforma $\langle O \rangle$.

$\dot{\varphi}, \omega$: Velocidad angular.

Luego, para obtener el modelo cinemático con el punto de control desplazado, se parte del análisis de la posición de la plataforma omnidireccional en cada uno de los ejes del sistema de coordenadas R , tomando en consideración el desplazamiento a . Por lo que analizando la se tiene lo siguiente:

$$x_a = x_o + a \cos(\varphi)$$

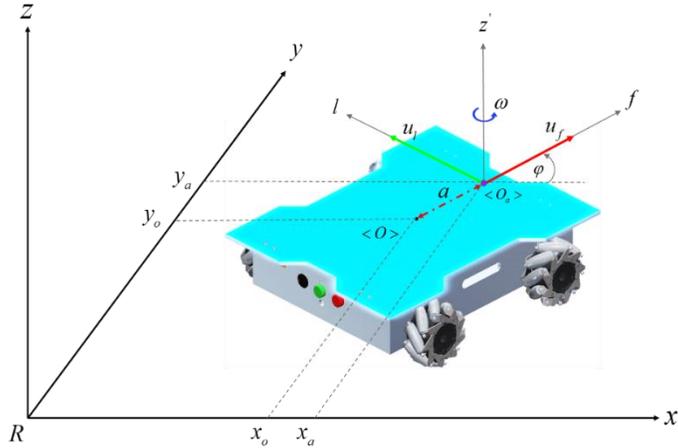
$$y_a = y_o + a \sin(\varphi)$$



MODELO CINEMÁTICO

Representación Cinemática con Punto de Operación Desplazado

Para obtener las velocidades con respecto a este nuevo punto de operación, se aplica la derivada parcial a las ecuaciones como se muestra a continuación:



$$\dot{x}_a = \dot{x}_o - a \dot{\varphi} \sin(\varphi)$$

$$\dot{y}_a = \dot{y}_o + a \dot{\varphi} \cos(\varphi)$$

Reemplazando las ecuaciones y , en las ecuaciones y respectivamente se obtiene:

$$\dot{x}_a = u_f \cos(\varphi) - u_l \sin(\varphi) - a \dot{\varphi} \sin(\varphi)$$

$$\dot{y}_a = u_f \sin(\varphi) + u_l \cos(\varphi) + a \dot{\varphi} \cos(\varphi)$$

Por último, se sabe que $\dot{\varphi} = \omega$, por lo tanto, el modelo matemático con el punto de operación desplazado queda definido por las siguientes expresiones:

$$\dot{x}_a = u_f \cos(\varphi) - u_l \sin(\varphi) - a \omega \sin(\varphi)$$

$$\dot{y}_a = u_f \sin(\varphi) + u_l \cos(\varphi) + a \omega \cos(\varphi)$$

$$\dot{\varphi} = \omega$$



MODELO CINEMÁTICO

Representación Cinemática con Punto de Operación Desplazado

Las ecuaciones se las puede expresar de forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & -a \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & a \cos(\varphi) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_l \\ \omega \end{bmatrix}$$

El modelo cinemático del robot omnidireccional se lo puede escribir en forma abreviada como se muestra a continuación:

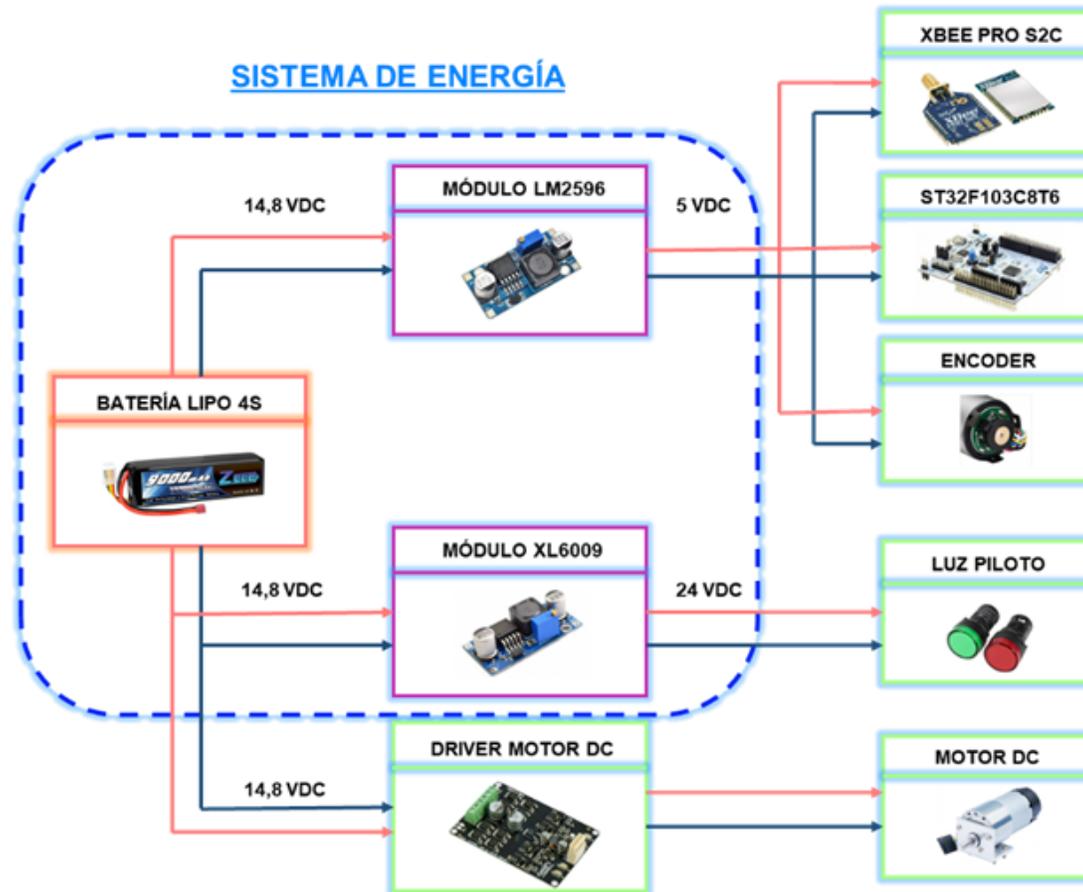
$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(\varphi) \mathbf{u}(t)$$

Donde $\mathbf{J}(\varphi)$ es la matriz Jacobiana que establece la relación entre las velocidades de la plataforma omnidireccional en el punto de operación $\langle O_a \rangle$, y las velocidades respecto a cada eje del sistema de referencia.



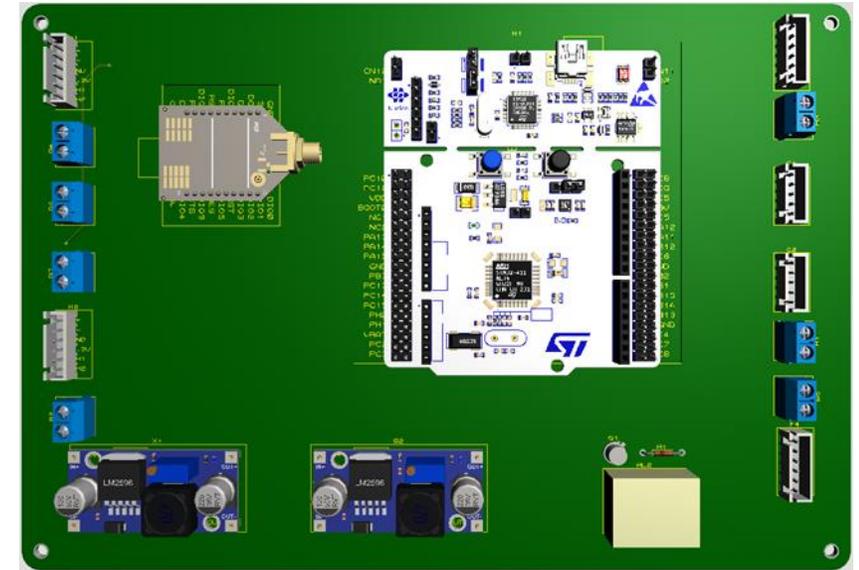
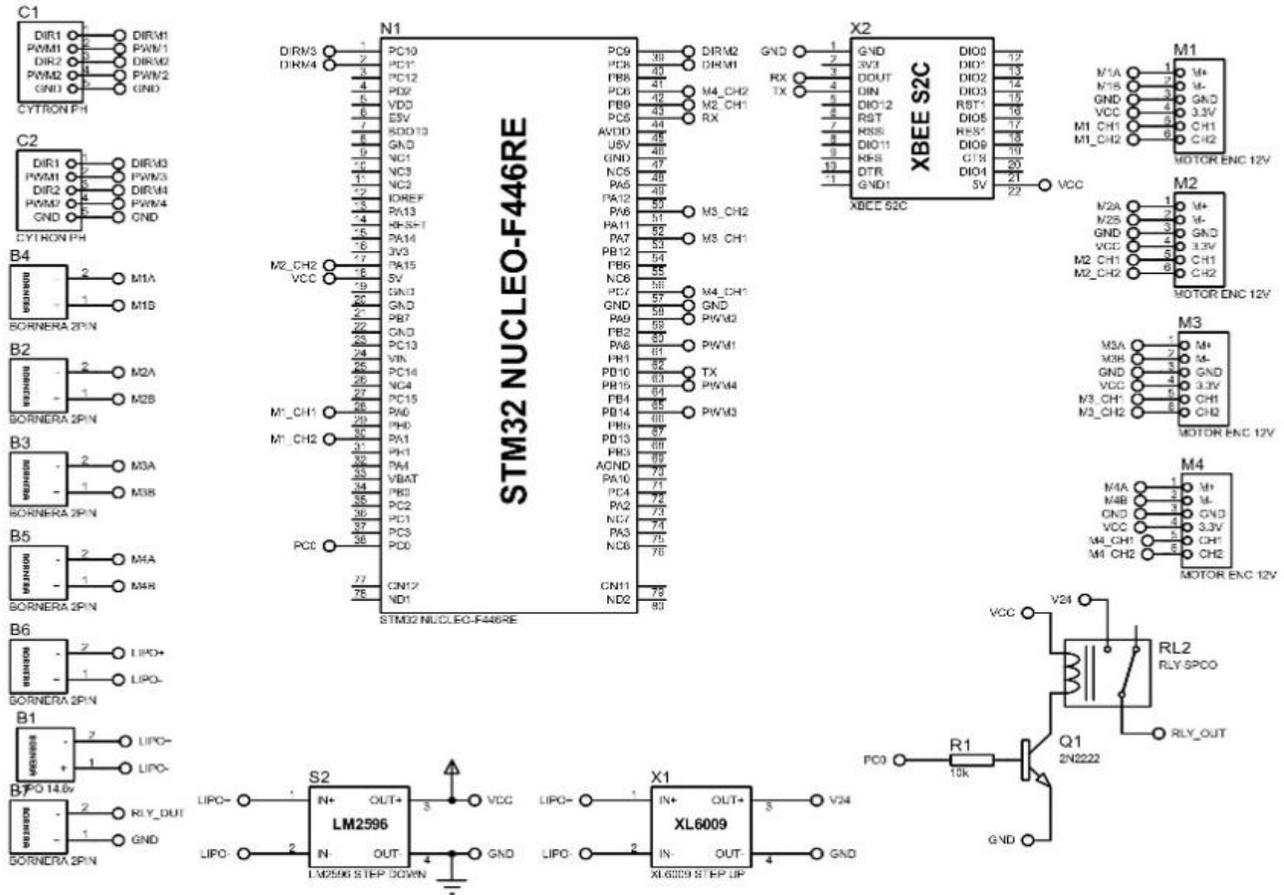
DISEÑO ELECTRÓNICO

SISTEMA DE ENERGÍA



DISEÑO ELECTRÓNICO

CIRCUITO DE LA PLATAFORMA



SISTEMA SERVO VISUAL

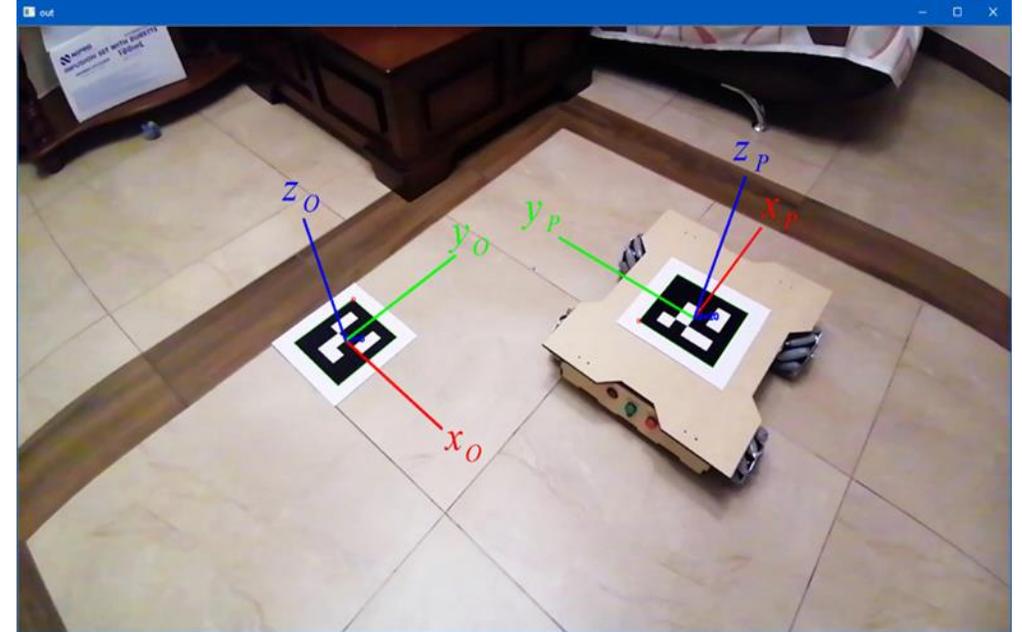
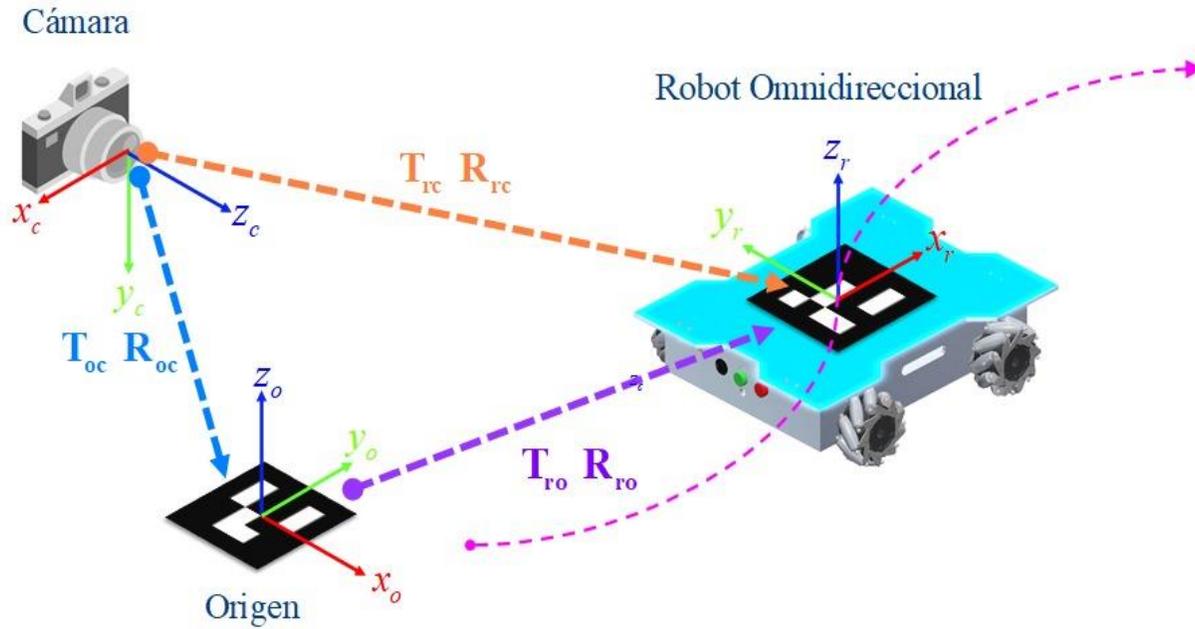
Etapas del Sistema de Visión Artificial



La etapa de visión artificial, donde se detallan cada uno de los subprocesos como la adquisición de imágenes, calibración de la cámara, detección de un marcador ArUco y su correspondiente estimación de POSE. Dichas aplicaciones se llevaron a cabo en el entorno de desarrollo integrado (IDE) QtCreator, haciendo uso de la librería para visión artificial OpenCV en el lenguaje de programación C++. Finalmente se definirá los 2 controladores que van a ser objeto de estudio y se analizará la estabilidad de cada uno de ellos.

SISTEMA SERVO VISUAL

Estimación de Pose de la Plataforma Omnidireccional



CONTROL DE LA PLATAFORMA

Controlador Cinemático No Lineal

El modelo cinemático del robot omnidireccional se lo puede escribir en forma abreviada como se muestra a continuación:

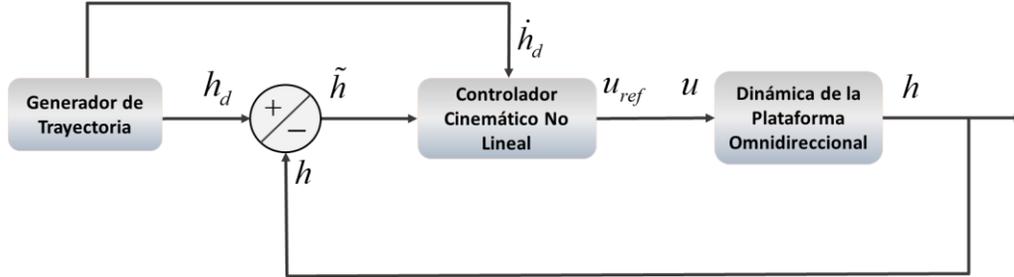


Diagrama de Bloques del Sistema de Control No Lineal

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(\varphi)\mathbf{u}(t)$$

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}\mathbf{u}$$

Donde $\dot{\mathbf{h}}$ representa el vector de velocidades respecto a cada eje del sistema de referencia, \mathbf{J} es la matriz jacobiana y \mathbf{u} es el vector de velocidades de la plataforma omnidireccional.

En función del modelo cinemático descrito se plantea la siguiente ley de control.

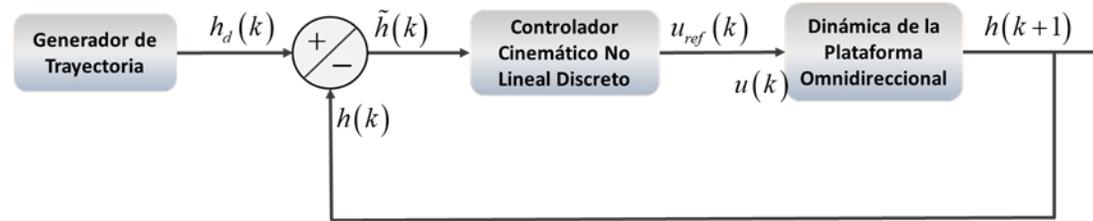
$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}})$$

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}))$$



CONTROL DE LA PLATAFORMA

Controlador Cinemático No Lineal Discreto de Alto Nivel



$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}\mathbf{u}$$

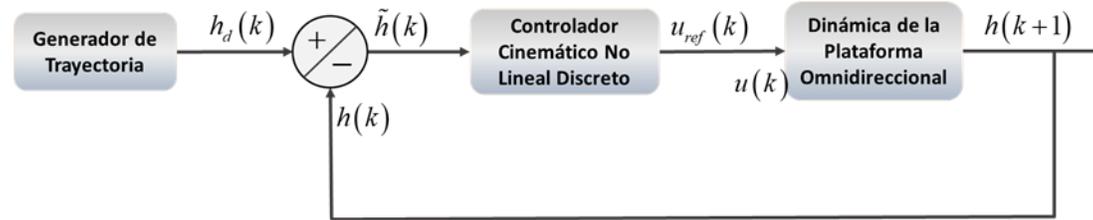
$$\frac{\mathbf{h}(k+1) - \mathbf{h}(k)}{T_o} = \mathbf{J}(k)\mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{h}(k+1) = \mathbf{h}(k) + T_o\mathbf{J}(k)\mathbf{u}(k)$$



CONTROL DE LA PLATAFORMA

Controlador Cinemático No Lineal Discreto de Alto Nivel



$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}\mathbf{u}$$

$$\frac{\mathbf{h}(k+1) - \mathbf{h}(k)}{T_o} = \mathbf{J}(k)\mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{h}(k+1) = \mathbf{h}(k) + T_o\mathbf{J}(k)\mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{u}_{\text{ref}}(k) = \frac{1}{T_o} \mathbf{J}^{-1}(k) \left[\mathbf{h}_d(k+1) - \mathbf{h}(k) - \mathbf{W}(\mathbf{h}_d(k) - \mathbf{h}(k)) \right]$$



Implementación de la interfaz para el Control de Trayectoria

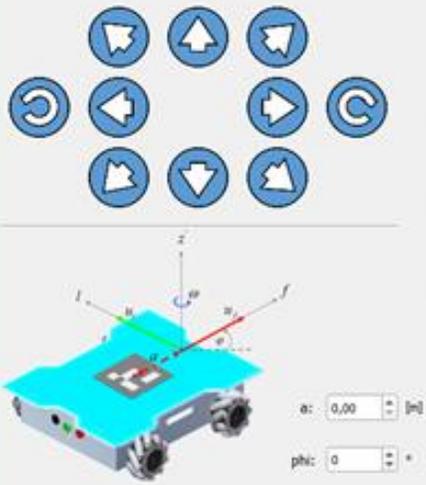
Control de Trayectoria Robot Omnidireccional

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L
PROYECTO DE TITULACIÓN
CONTROL DE TRAYECTORIA - PLATAFORMA OMNIDIRECCIONAL

INGENIERÍA MECATRÓNICA
ESPE - LATACUNGA

1982
Ecuador

CONTROL MANUAL



$\alpha: 0,00$ [m]
 $\phi: 0$ °

TRAYECTORIA DESEADA

Elipse Infinito Espiral Maripos Seno

$Ax: 0,40$ [m] $h: 1,10$ [m] $w: 0,20$ [m]
 $Ay: 0,40$ [m] $k: 0,75$ [m] $T: 30$ [s]

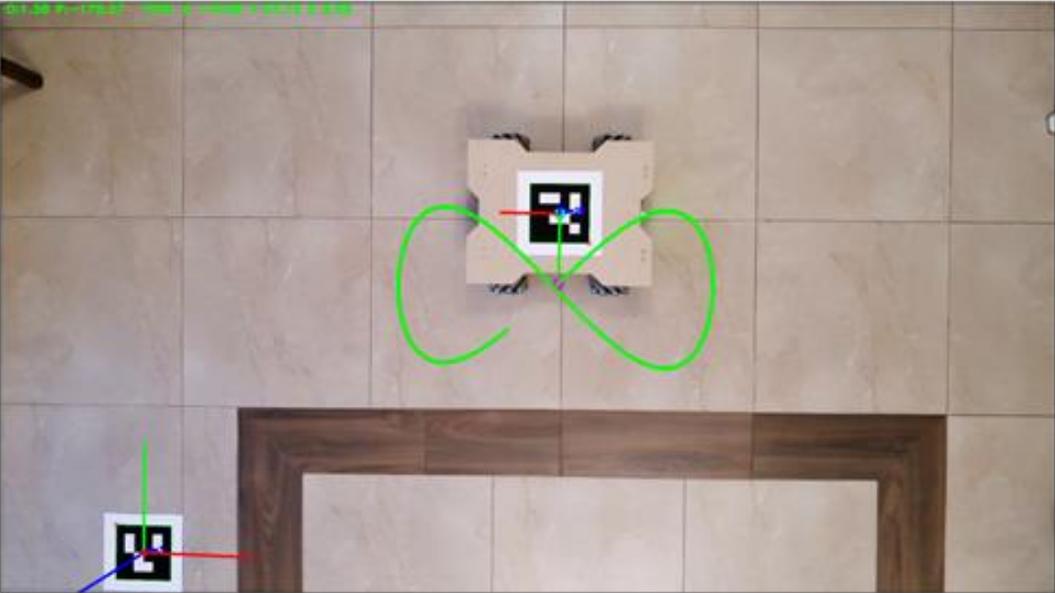
CONTROLADORES

Controlador No Lineal $K: 2,0$
 Controlador Discreto $W: 0,90$
 Controlador Clásico

Mover Origen **Play** Trayectoria Real

$Xe: 1,30958$ [m] $Ye: 0,937285$ [m] $\Phi: -179,37$ °

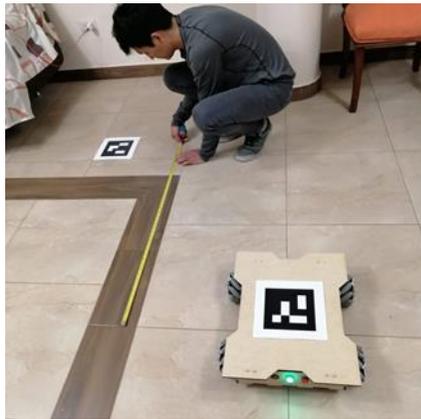
100%



PRUEBAS Y RESULTADOS

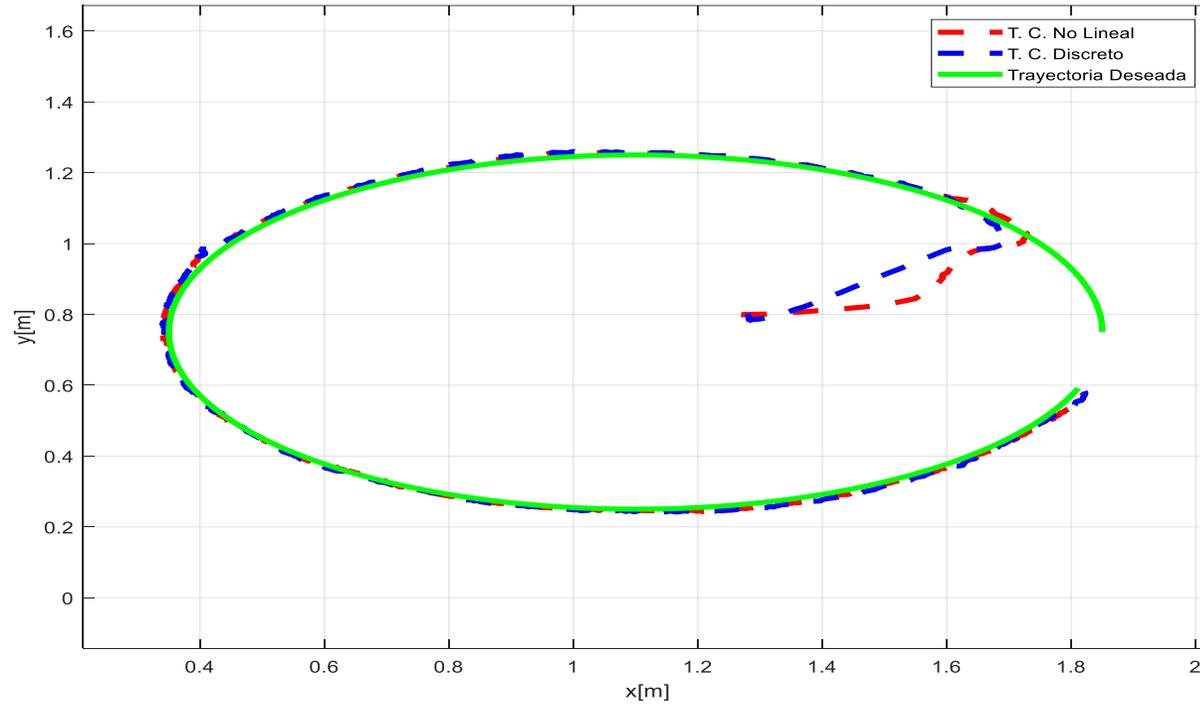
Estimación de la POSE

Los resultados obtenidos de las 10 pruebas realizadas colocando los marcadores a diferentes distancias entre sí. Se muestran en la Tabla 12 donde , representan los datos estimados, y son los datos reales obtenidos de forma manual y por último , y representan el error correspondiente a cada una de las variables.



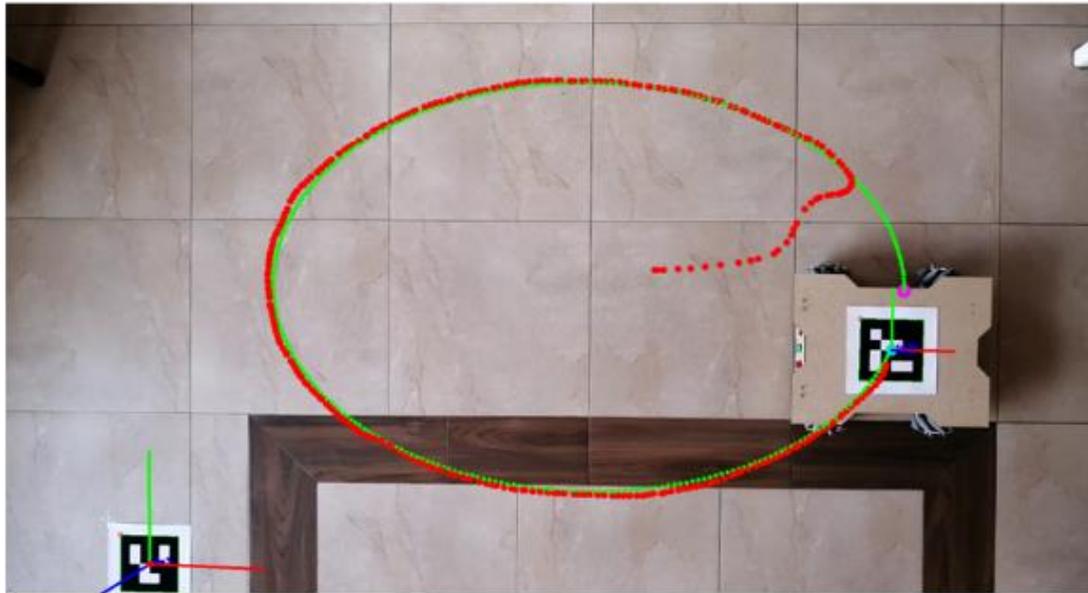
$x_r [m]$	$y_r [m]$	$\varphi_r [^\circ]$	$x_e [m]$	$y_e [m]$	$\varphi_e [^\circ]$	$e_x [m]$	$e_y [m]$	$e_\varphi [^\circ]$
0	1.5	0	-0.02	1.52	-0.17	0.02	-0.02	0.17
0.5	0.5	90	0.53	0.48	91.13	-0.03	0.02	-1.13
1	0	0	0.99	-0.14	0.02	0.01	0.14	-0.02
0.75	0.75	45	0.77	0.75	46.12	-0.02	0	-1.12
1.2	0	180	1.19	0.01	179.65	0.01	-0.01	0.35
0	0.5	20	0.03	0.56	21.53	-0.03	-0.06	-1.53
2.5	1.5	0	2.53	1.49	0.11	-0.03	0.01	-0.11
1.1	1	-45	1.08	1.03	-45.5	0.02	-0.03	0.5
1.5	1.5	-90	1.51	1.51	-89.7	-0.01	-0.01	-0.3
1.75	2	60	1.74	2.01	61.5	0.01	-0.01	-1.5

PRUEBAS Y RESULTADOS

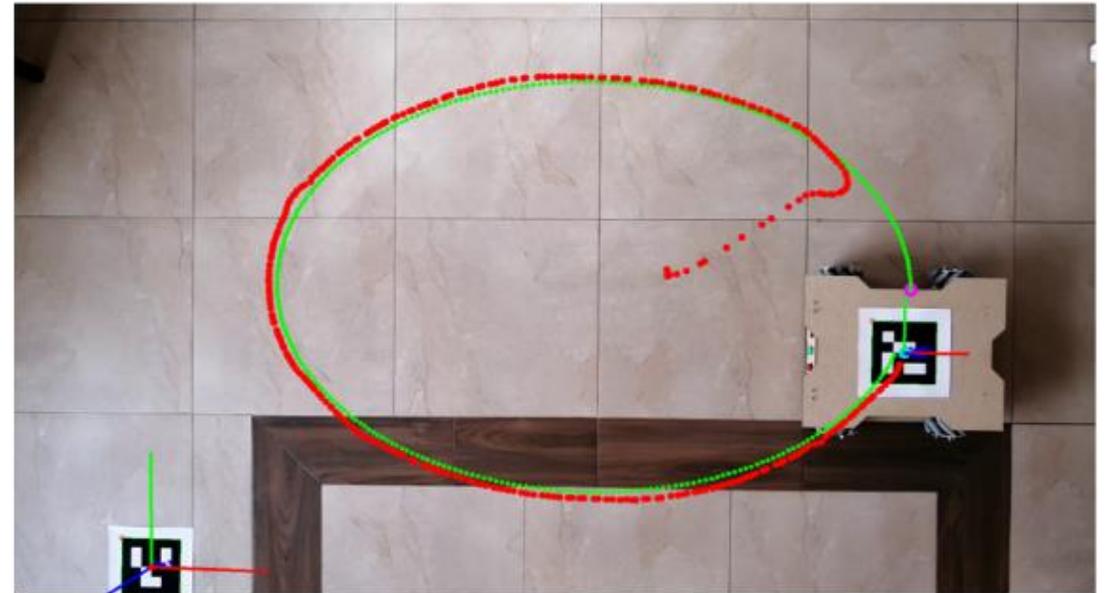


PRUEBAS Y RESULTADOS

a) Controlador No Lineal



b) Controlador No Lineal Discreto



CONCLUSIONES

Existen varias configuraciones de robots omnidireccionales que se pueden clasificar según el tipo de rueda que utilizan, según su número de ruedas y según su configuración mecánica. Cada una de estas configuraciones permiten al robot móvil realizar un desplazamiento con 3 grados de libertad sobre el plano por el que circula, Sin embargo cada configuración posee sus ventajas y desventajas que vienen relacionadas con la tracción que ofrecen, su complejidad al realizar control sobre el sistema, la estabilidad que presentan en su desplazamiento y la complejidad del diseño mecánico, muchas características limitan el número de aplicaciones a las que podría estar destinado un robot omnidireccional. Sin embargo, el robot omnidireccional de ruedas Mecanum es la configuración que ofrece una mayor tracción y alta estabilidad en su desplazamiento permitiendo el desarrollo de aplicaciones con mayor facilidad siempre y cuando se tome en cuenta que esta configuración presenta una mayor complejidad en el control y requiere de un diseño mecánico más complejo.



CONCLUSIONES

La estimación de pose por medio de los marcadores binarios pertenecientes al módulo ArUco disponible en la librería de OpenCV que ofrecen resultados altamente confiables, lo cual permitió la implementación de dicha estimación como medio de realimentación del sistema servo visual propuesto. Sin embargo, la fiabilidad de los datos de POSE están sumamente ligados al proceso de calibración de la cámara, específicamente al factor de re-proyección resultante, debido a que este parámetro es el encargado de evaluar la confiabilidad de los parámetros intrínsecos estimados en este proceso, concluyendo que mientras más cercano a cero sea dicho factor más fiables y precisos serán los resultados estimados de la POSE del marcador binario. Por otro lado, el uso de un marcador binario extra para el proceso de estimación de la POSE de la plataforma omnidireccional, permite fijar el sistema de coordenadas al plano por el cual se desplaza el robot móvil, facilitando el proceso de identificación manual de errores presentes en el proceso de estimación de los vectores de traslación y rotación. Además, resulta mucho más factible proponer trayectorias parametrizadas en el tiempo con origen en el sistema de coordenadas.



CONCLUSIONES

El diseño y la construcción de la plataforma omnidireccional en un tablero de fibra de densidad media, fue muy acertado para la resolución del seguimiento de trayectorias, debido a que no se requiere de un diseño robusto, sino por el contrario, se requiere de una estructura liviana que facilite el desplazamiento de la plataforma omnidireccional sin obligar a los actuadores a realizar un esfuerzo innecesario en el transporte de su estructura, pero que a su vez permita el alojamiento de todos los componentes en su interior. Por otro lado, no se presentaron inconvenientes en la reproducción del diseño mecánico en el tablero de MDF debido a que se utilizó el corte por láser para la elaboración de las diferentes partes que conforman la estructura.

Luego de realizar varias pruebas en las cuales se puso en prueba la eficiencia y robustez de los algoritmos de control moderno, se pudo evidenciar un mejor rendimiento por parte del controlador discreto, debido a las señales mucho más estables que se obtuvieron, lo cual permitió una mejor convergencia de la curva real con respecto a la curva deseada. Dichos resultados fueron contrarrestados con un algoritmo de control clásico permitiendo evidenciar la superioridad de los controladores modernos frente al control tradicional ya que la mayoría de sistemas tienen varias variables a controlar, debido a que dicho controlador está orientado al control de sistemas SISO. Sin embargo, se pudo apreciar una convergencia medianamente aceptable con respecto a la curva deseada, sin embargo no es recomendable la implementación de dicho controlador para la resolución de trayectorias en las cuales se requiera alta precisión.



RECOMENDACIONES

La implementación de encoders en el proceso medición de la velocidad de cada uno de los motores resulta muy eficiente y confiable siempre y cuando se realice un correcto acondicionamiento de las señales, debido a que por la velocidad característica resultante, la señal rebota y se producen errores en la medición lo cual puede llevar a la inestabilidad a todo el sistema. Sin embargo, dicho problema queda resuelto a través de la implementación de filtro pasa bajo.

El proceso de calibración de la cámara es indispensable para poder obtener los parámetros intrínsecos de la cámara, necesarios para poder conocer con exactitud la proyección que tiene un punto 3D en el plano de cámara. Por tal motivo es posible realizar el proceso de calibración hasta obtener un error de re-proyección lo más cercano a cero posible, debido a que en dicho caso los resultados obtenidos en el proceso de estimación serán mucho más confiables y precisos.

Debido a la baja disponibilidad de los componentes en el país se recomienda realizar la adquisición de los componentes con el tiempo suficiente debido a que el proceso podría resultar muy tardío debido a la importación de los componentes. Sin embargo, los algoritmos de control moderno podrían ser implementados en un sistema con características similares agilizando la ejecución de análisis y la obtención de resultados.

