

Seguidor de Línea con control PID

(PID: Proporcional Integral Derivativo)

Line Follower with PID control (PID: Proportional Integral Derivative)

Presentación: 20/09/2024

Bruno Julián Chiabrando

UTN – Facultad Regional San Francisco

bchiabrando@facultad.sanfrancisco.utn.edu.ar

Angel Aguilar

UTN – Facultad Regional San Francisco

aaguilar@facultad.sanfrancisco.utn.edu.ar

Rodolfo Podadera

UTN – Facultad Regional San Francisco

rpodadera@facultad.sanfrancisco.utn.edu.ar

Resumen

Se desarrolla un robot seguidor de línea controlado por un sistema proporcional-integral-derivativo conocido como PID, cuyos parámetros de sistema se pueden configurar en cualquier momento a través de una interfaz de usuario (UI) simple, también se traza en tiempo real el error obtenido por la matriz de sensores TCRT5000.

El microcontrolador identificado como ESP32 cuenta con FreeRTOS es utilizado para poder realizar múltiples tareas simultáneamente, controla sensores, actuadores y la comunicación con el servidor web a través de HTTP Request/Response. El dispositivo final tiene un correcto funcionamiento y una alta fidelidad a la hora de estabilizarse en los cambios del circuito a seguir, de esta forma cumple con los objetivos principales, alcanzando una mayor eficiencia que los robots de velocidad convencionales.

Palabras clave: PID, Robot, Seguidor de línea, FreeRTOS, HTTP.

Abstract

Line Follower Robot is controlled by a proportional-integral-derivative system known as PID is developed, the parameters of this system can be configured at any time through a simple user interface (UI), also the error obtained by the TCRT5000 sensor array is plotted in real time.

The ESP32 microcontroller with FreeRTOS is used to be able to perform multiple tasks simultaneously, it controls sensors, actuators and the communication with the web server through HTTP Request/Response. The final device has a correct operation and high fidelity when it comes to stabilizing in the changes of the circuit to follow, in this way it meets the main objectives, reaching greater efficiency than conventional speed robots.

Keywords: PID, Robot, Line Follower, FreeRTOS, HTTP.

Introducción

El presente trabajo busca realizar un robot que sea capaz de recorrer cualquier circuito que posea una línea central continua de manera autónoma. El dispositivo cuenta con un microcontrolador, encargado de controlar a través de un sistema proporcional – derivativo – integral (PID) la velocidad de los motores lo cual nos permite alcanzar una mayor eficiencia y velocidad a la hora de seguir la línea.

Los parámetros de dicho controlador PID pueden ser monitoreados y modificados desde una interfaz de usuario (UI) la cual se puede acceder de manera local a través de un servidor web creado por el microcontrolador ESP32. Para alcanzar una mayor eficiencia tanto en el funcionamiento como en la comunicación con el usuario se hace uso de FreeRTOS que nos permite ejecutar las distintas tareas necesarias en simultaneo, optimizando los recursos brindados por el microcontrolador seleccionado.

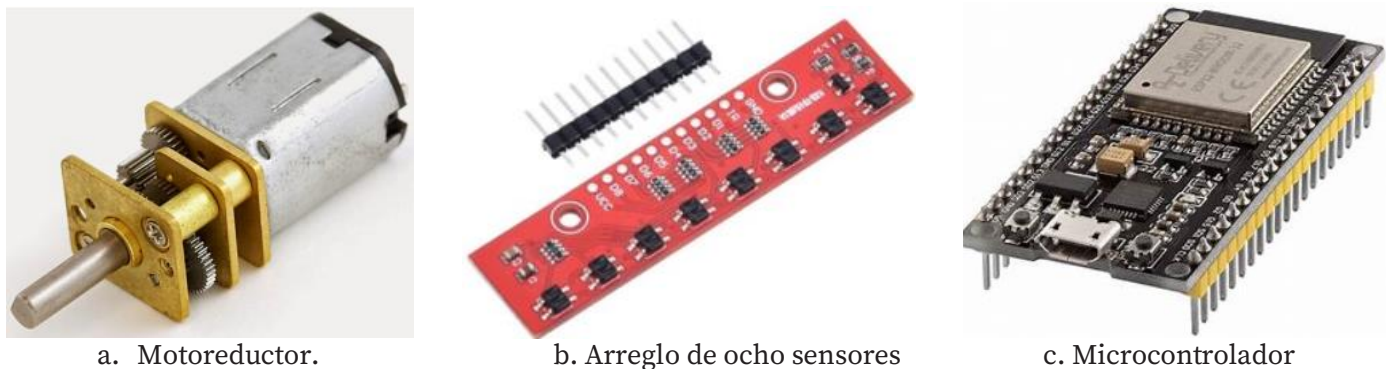
Objetivos

- Elaborar un control PID para el manejo de velocidades de los motores que permita el seguimiento de una línea.
- Programar la comunicación entre cualquier dispositivo con conexión a la red local y el microcontrolador ESP32 para la calibración inalámbrica del controlador del robot seguidor de línea.
- Alcanzar luego de pruebas y calibraciones una mayor eficiencia que robots velocistas convencionales.

Desarrollo

Los robots seguidores de línea son capaces de seguir un camino trazado por una línea central continua. La cual es de un color que contrasta con el del piso, por lo general la línea es blanca y el resto del suelo es negro. Una de las virtudes de esta configuración es que se puede realizar de múltiples maneras y pueden ser tan complejos como la persona que lo realice quiera. Año tras año las tecnologías utilizadas para desarrollarlos evolucionan y uno de los motivos principales son las distintas competencias que se realizan. El robot desarrollado cumple con las reglas explícitas por la Liga Nacional de Robótica de Argentina por lo que se encuentra apto para competir en las próximas ediciones.

Cuenta con actuadores, (figura 1.a) elementos principales del robot velocista, del cual depende el desempeño que se pueda alcanzar, aquí se utiliza un motoreductor pololu HP, 6V de corriente continua. El término reducción refiere a cuantas vueltas dará el motor para que los engranajes produzcan una vuelta a la salida del eje, de esta manera se incrementará el torque a costas de una reducción de velocidad.



a. Motoreductor.

b. Arreglo de ocho sensores

c. Microcontrolador

Figura 1. Partes constitutivas de hardware.

(Las imágenes de la figura, fueron extraídas de datasheet de fabricantes de tecnología, accesibles en la red)

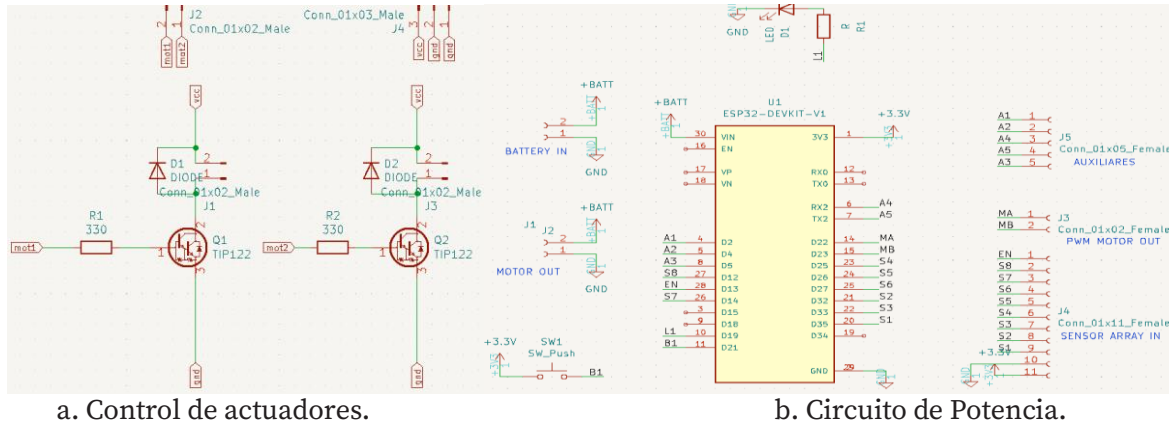
El enfoque de seguimiento de líneas en robótica ha sido extensamente explorado (Martínez Ortiz, 2015-2016), respecto a lo cual se utilizan de manera inicial, sensores preparados para la detección de línea y ubicación del robot se utilizaron ocho sensores ópticos infrarrojos TCRT5000 dispuestos en un circuito impreso y fueron trabajados de manera digital conectando cada uno de los sensores a una entrada digital y se los alimentó con 3.3 V (figura 1.b).

Para el control del dispositivo se utiliza un microcontrolador de la empresa Espresif ESP32 en formato dev module. El mismo integra Wifi, Bluetooth, los GPIOs necesarios y también brinda la posibilidad de uso de sistema operativo FreeRTOS, que nos permite administrar un sistema multitareas robusto para obtener aprovechar de la manera óptima el algoritmo (figura 1.c).

Los modelos de robots siguen siendo fundamentales en la investigación actual, en su forma de control (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2020). Para el dominio de actuadores se diseñó un circuito encargado de recibir una señal de control PWM y alimentar a los motores en mayor o menor medida.

Se aprecia en la (figura 2.a) el TIP122, el cual está formado por un par de transistores NPN en conexión Darlington, su funcionamiento es igual al de un NPN. Excitando la base de este a través de una señal PWM podemos establecer un flujo de corriente entre emisor y colector y así alimentar a los motores. En esta placa podemos encontrar el conexionado de los dos motores como la alimentación y la señal de PWM proveniente de la placa de control.

Para controlar el robot se diseñó una segunda placa en donde va ubicado el módulo ESP32 (figura 2.b) junto con sus periféricos, los distintos pines para conexionado de sensores, motores, y alimentación de la placa de potencia.



a. Control de actuadores.

b. Circuito de Potencia.

Figura 2. Esquemáticos.

El diseño del robot seguidor de línea ha sido estudiado con técnicas de control PID (Parikh, Shah, & Sheth, 2014). El controlador PID procesa los datos del sensor y los utiliza para controlar el ángulo de giro a través de la velocidad enviada a cada motor, para de esta forma mantenerlo en curso.

Consideraciones para simplificar el análisis: el desplazamiento es causado únicamente por la rotación de las ruedas y la superficie en donde se desplaza es totalmente lisa.

El uso de configuraciones diferenciales ha mostrado ser eficaz en robótica (Solaque Guzmán, Molina Villa, & Rodríguez Vásquez, 2014). En estructura diferencial se consideran tres grados de libertad: las distancias x y y de posición y el ángulo ϕ de orientación. Para poder lograr un movimiento controlado, se deben tener dominio sobre “ V_r ” la velocidad de la rueda derecha y “ V_l ” la velocidad de la rueda izquierda. El objetivo de modelar el robot es buscar una relación directa de cómo afectan las entradas “ V_r y V_l ”, a los estados del sistema “ x, y, ϕ ”. Podemos observar los distintos grados de libertad, y se resalta su dependencia de la velocidad de cada motor.

Una vez definidas las entradas y salidas de nuestro sistema, notamos que nuestro robot puede trasladarse con una velocidad lineal “ v ” y rotar con una velocidad angular “ ω ”.

$$v = r (V_r + V_l) / 2 \quad (1)$$

$$\omega = r (V_r - V_l) / b \quad (2)$$

Siendo r = Radio de la rueda. b = distancia entre las ruedas V_r = Velocidad motor-derecha. V_l = Velocidad motor-izquierda. Teniendo las velocidades definidas planteamos las distintas ecuaciones que describen el movimiento del robot.

$$x = v * \cos \phi \quad (3)$$

$$y = v * \sen \phi \quad (4)$$

$$\phi = \omega \quad (5)$$

Trabajando algebraicamente con las ecuaciones alcanzadas llegamos a las ecuaciones 6, 7 y 8 que determinan el movimiento a partir de la tracción diferencial.

$$x = [(V_r + V_l) r \cos \phi] / 2 \quad (6)$$

$$y = [(V_r + V_l) r \sen \phi] / 2 \quad (7)$$

$$\phi = [(V_r - V_l) r / b] \quad (8)$$

Al integrar las ecuaciones (6), (7) y (8) se consigue la posición y orientación en un sistema de referencia absoluto. La modelación de robots móviles con tracción diferencial es una técnica clave para el diseño de robots (Collazo Cuevas et al., 2009). El movimiento de este se realiza con los motoredutores de 6V de corriente continua, cuyas características extraídas de hoja de datos se pueden apreciar en tabla 1:

Parámetro	Símbolo	Valor
Relación	η	30:1
Voltaje nominal	$V_{nominal}$	6V
RPM sin carga	Θ_{free}	104.72 rad/s
Corriente máxima	i_{max}	1.6 A
Corriente nominal	i_{free}	100 mA
Torque máximo	T_{max}	0.0557 Nm

Tabla 1. Tabla de valores extraídas de datasheet motor DC

Para obtener el modelo se analiza la velocidad angular de cada rueda a partir del circuito equivalente para un motor de corriente directa, tal como se muestra en la figura 3.

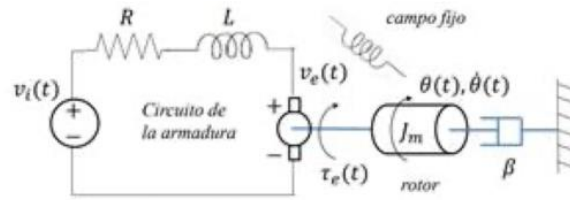


Figura 3. Circuito electromagnético de motor DC

(La imagen de la figura 3, fue extraída del sitio <http://controlautomaticoeducacion.com>)

Diversos autores han investigado las bases de los sistemas de navegación en robots móviles autónomos (Siegwart, Nourbakhsh, & Scaramuzza, 2011; Bhatia & Jain, 2016). Debido a que los parámetros proporcionados por el fabricante pertenecen a la salida del tren de engranes, se reducirá el estudio al considerar solamente un momento de inercia. A continuación, se obtienen las ecuaciones diferenciales de la parte eléctrica por la ley de voltajes de Kirchoff y de la parte mecánica por la ley de Newton.

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + v_e(t) = v_i(t) \quad (9)$$

Las ecuaciones del subsistema magnético son:

$$T(t) = P(t) / \omega_m(t) = k_t I(t) \quad (10)$$

$$e(t) = k_e \omega_m(t) = k_e d\theta(t)/dt \quad (11)$$

Reemplazando (11) aplicando Laplace a la ecuación (9), obtenemos la ecuación para la parte eléctrica.

$$R I(s) + L s I(s) + k_e s \theta(s) = V_i(s) \quad (12)$$

Por otro lado, para la parte mecánica del motor aplicamos las leyes de Newton para movimientos mecánicos rotacionales y obtenemos la ecuación 13.

$$T(t) = J_m d^2\theta(t)/dt^2 + b d\theta(t)/dt \quad (13)$$

$$\mathcal{L}[T(t)] = T(s) = J_m s^2 \theta(s) + b s \theta(s) \quad (14)$$

Reemplazando 10 en 14 se obtiene:

$$k I(s) = J_m s^2 \theta(s) + b s \theta(s) \therefore k_t I(s) / (J_m s + b) s = \theta(s) \quad (15)$$

Reemplazando 15 en 12 llegamos a:

$$R I(s) + L s I(s) + k_e [k_t I(s) / (J_m s + b)] = V_i(s) \quad (16)$$

Finalmente, para obtener la relación buscada entre la salida del motor y la entrada de voltaje tal como se observa en la ecuación 17.

$$\theta(s)/V_i(s) = k_t / [(R + Ls)(J_m s + b) + k_e k_t] = k_t / [J_m L s^2 + (J_m R + b L) s + R b + k_e k_t] \quad (17)$$

Las características eléctricas de Resistencia e Inductancia de armadura se obtienen a través de la medición del dispositivo físico, mientras que el voltaje de entrada será el valor nominal que especifica el fabricante. $R = 31,3 \Omega$ $L = 5,1 \text{ mH}$ $v_i(t) = 6V$. Los valores de las constantes eléctricas y magnéticas los calculamos con los datos presentados en la tabla 1 correspondientes a los actuadores utilizados.

$$k_e = v_{\text{nominal}} / \theta_{\text{free}} = 0.0573 \text{ v / (rad/seg)} \quad (18)$$

$$k_t = T_{\text{max}} / I_{\text{max}} = 0.034 \text{ N m / A} \quad (19)$$

Los fundamentos de robótica de (Schilling 1990) siguen siendo una referencia esencial en el análisis de parámetros, mecánicos de momento de inercia y la constante de fricción al ser más difíciles de cuantificar, se hicieron de uso de unos valores pequeños obtenidos por un motor similar al utilizado para este trabajo, los valores son los siguientes:

$$J_m = 1 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2 \quad \beta = 1 \times 10^{-7} \text{ Nm/(rad/s)}$$

Una vez obtenidos los modelados de estos bloques que son de vital importancia para nuestro sistema, unimos cada uno de ellos y finalmente obtenemos un diagrama de nuestra función de transferencia final, se aprecia en figura 6.

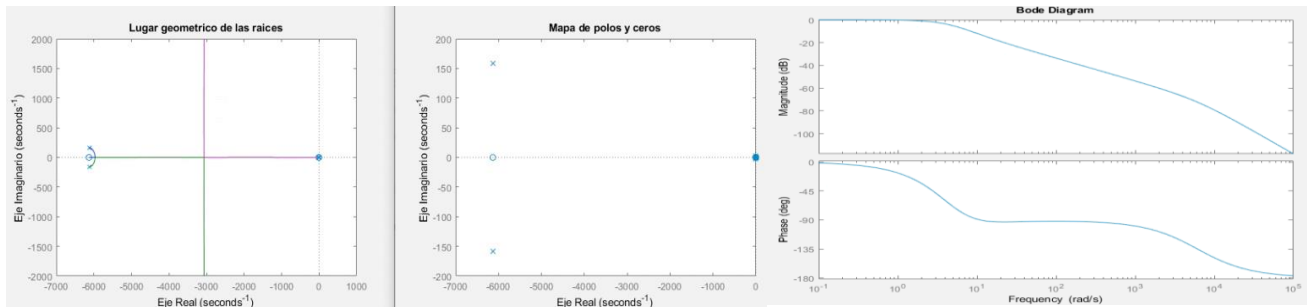
En nuestro diagrama se presenta un voltaje inicial base con el cual ambos motores se ven afectado en un inicio, nuestra retroalimentación va a afectar negativamente al voltaje de entrada del motor izquierdo y positivamente al voltaje de entrada del motor derecho y de esa manera logrará el giro deseado.

Para obtener una única función de transferencia de nuestro sistema se pueden aplicar técnicas de simplificación o software que facilite cálculos, dicha ecuación ya resuelta es la 20.

$$\frac{1.27e07s^2 + 7.814e10 s + 4.872 e 11}{s^5 + 1.227 e04 s^4 + 3.774 e07 s^3 + 4.696e08 s^2 + 1.464e9s} \quad (20)$$

Los robots móviles actuales, evolucionaron a técnicas de control avanzadas (Bhatia & Jain, 2016). Con la respuesta obtenida se calculó el lugar geométrico de las raíces además del mapa de polos y ceros, estos gráficos se pueden observar en la figura 6 (a), la cual nos va a ser útil para realizar algunos análisis.

La función de transferencia ya posee un término integrador $1/s$, lo que ocasiona que no sea necesario utilizarlo en el controlador PID. Por otro lado, también se obtuvo el diagrama de bode correspondiente a nuestro Sistema como se aprecia en la figura 4 (b), con el efecto de sus polos y ceros y donde se puede analizar la frecuencia de cambio de set point a la que se ve afectada la fase y la amplitud.



a) diagrama de polos y ceros b. Diagrama de bode del sistema

Figura 4. Diagrama de bode del sistema (Matlab)

Con todos los valores calculados, podemos finalizar la construcción de la simulación en Simulink, uniendo los bloques modelados junto al controlador PID como indica la figura 5. Se puede observar el ángulo de giro y el desplazamiento en el plano de nuestro robot simulado a través de XY ploter.

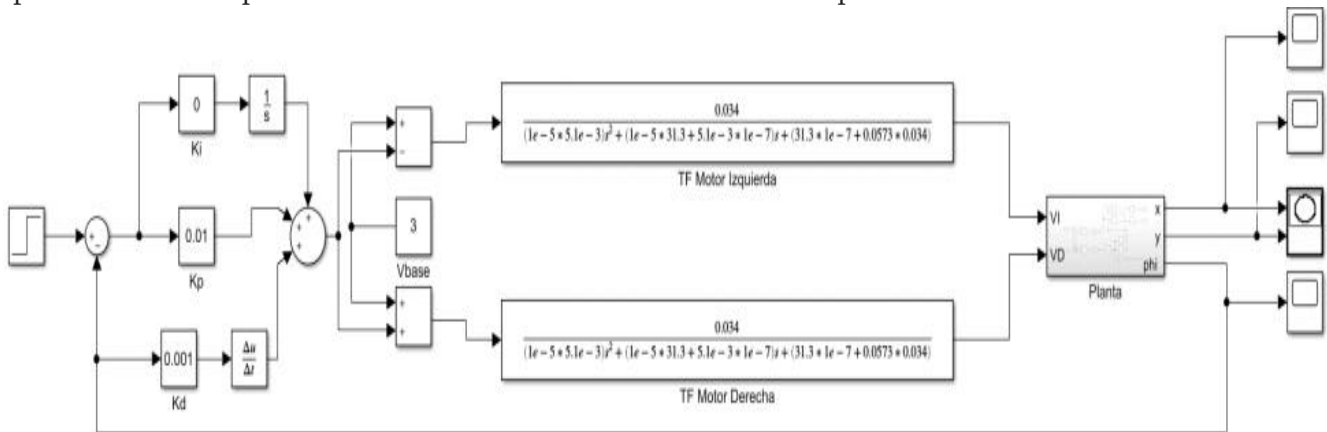


Figura 5. Robot seguidor de línea modelado

El diseño de un robot velocista controlado se pudo implementar (Aucatoma Tiban, 2022). El código se hizo de manera modular, separando las funcionalidades en librerías para un mejor manejo y simpleza a la hora de realizar modificaciones. Para el caso de la lectura de los sensores se hizo una librería utilizando programación orientada a objetos para facilitar la utilización de las distintas funciones a lo largo del código.

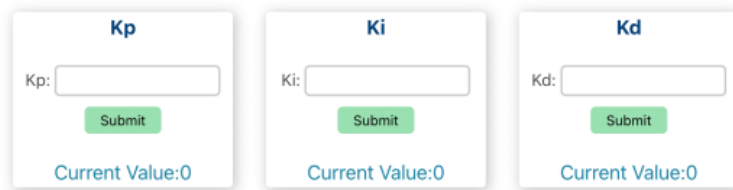


Figura 6. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario mostrada en la figura 6 se realizó con HTML, estilizándolo con CSS, dándole funcionalidad con JS. Estos tres archivos se encuentran guardados en la memoria flash de la ESP32 a través de SPIFFS que es un sistema de archivos ligero creado para microcontroladores. El ajuste calculado por el PID se aplicará de manera positiva en el canal PWM correspondiente al motor de la derecha y negativamente al motor de la izquierda, debido a la manera en que planteamos el error.

Para el control general de las distintas etapas del robot se programó una máquina de estados encargada de monitorear y comandar al robot, esta es una de las tareas principales y corre en el núcleo 1 del microcontrolador.

Resultados

En el primer encendido del prototipo se debió obtener a prueba y error la velocidad de partida necesaria para que el robot se traslade sobre una línea recta y que dicho valor no sea demasiado alto como para que salga de pista. Una vez configurado el valor de velocidad de partida se calibraron los parámetros del controlador PID, primeramente, la constante del término proporcional K_p , la misma presentó un correcto funcionamiento al valor de 50, en el caso de K_i al no existir error estacionario se dejó en 0, y K_d dio buenos resultados en un valor de 4. Esto se pudo calibrar de una manera sencilla desde la interfaz de usuario.

Conclusiones

La interfaz de usuario permite una configuración inalámbrica y facilita la rapidez y facilidad de la calibración. La posibilidad de monitorear gráficamente el error actual en todo momento brinda facilidad para deducciones y nuevas calibraciones. Tanto el algoritmo del controlador PID como el de FreeRTOS permite una rápida acción de los motoredutores, ya que con cada lectura de los sensores en pista puede predecir los errores y usar los anteriores para mejorar su funcionamiento y, por tanto, la autonomía del movimiento de cada motor sea independiente según lo requiera. Gracias al análisis de los polos y ceros se detectó que el término integrador ya estaba en la función de transferencia que describía al sistema, ya que no existía término independiente en el denominador lo que generaba un polo en el origen. Esto describe un integrador mecánico, que en nuestro sistema se presenta ya que al realizar una corrección tras un error sensado no vuelve al origen si no que se mantiene en esa corrección. Al usar nuestro prototipo por un tiempo prolongado notamos que la respuesta de nuestro sistema varía, exigiendo una nueva calibración para volver a su comportamiento ideal

Referencias

- Parikh, P., Shah, H., & Sheth, S. (2014, June). A Mechatronics design of a line tracker robot using Ziegler Nichols control technique for P, PI and PID controllers. In International Mechanical Engineering Congress (IMEC-2014) (pp. 13-15).
- Martinez Ortiz, David (2015-2016). Robótica para seguimiento de líneas (robotics for line tracking). Escola Tecnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona (pp. 1-106).
- L. E. Solaque Guzmán, M. A. Molina Villa y E. L. Rodríguez Vásquez, «Seguimiento de Trayectorias con un Robot Móvil de Configuración Diferencial,» Ing. USBMed, vol. 5, n° 1, 2014.
- J. I. Collazo Cuevas, E. Gorrostieta Hurtado, J. C. Pedraza Ortega, U. G. Villaseñor Carrillo, R. A. Romero Torres y M. A. González Aguirre, «Modelación de un Robot Móvil de Dos Ruedas con Tracción Diferencial,» 2009.
- Aucatoma Tiban Jairo Patricio (febrero 2022). Diseño E Implementación De Un Robot Velocista Controlado Mediante Wifi Utilizando Una Tarjeta De Desarrollo Esp32- Wroom. Instituto Superior Tecnológico Vida Nueva (pp. 27-40).
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots* (2ª ed.). MIT Press.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2020). *Robot modeling and control* (2ª ed.). Wiley.
- Bhatia, S., & Jain, M. (2016). *Mobile robots: Navigation, control and remote sensing*. Wiley.
- Schilling, R. J. (1990). *Fundamentals of robotics: Analysis and control*. Prentice Hall.