

CONTROL PREDICTIVO POR MODELO PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA EN UN ROBOT MÓVIL DE RUEDAS TIPO DIFERENCIAL

Erik Reyes Reyes¹, Rogelio Ernesto García Chavez¹, Ángel Adrián Orta Quintana¹, Ramón Silva Ortigoza¹,
Magdalena Marciano Melchor¹, Sadrac Eliseo Santiago Nogales²

¹CIDETEC Laboratorio de Mecatrónica y Energías Renovables

²ESIME Azcapotzalco

Instituto Politécnico Nacional

Boletín No. 104, 1o. de septiembre de 2024

Resumen

Un control predictivo por modelo sin restricciones para solucionar la tarea de seguimiento de camino para un robot móvil con ruedas tipo diferencial es presentado en este trabajo. Particularmente el controlador propuesto soluciona la tarea de seguimiento de trayectoria empleando un horizonte de 6 muestras.

1. Introducción

Los robots móviles de ruedas representan una de las áreas más dinámicas y prometedoras en la robótica moderna. Estos sistemas autónomos o semiautónomos están diseñados para moverse a través de diversos entornos, desde superficies planas en laboratorios hasta terrenos irregulares en entornos exteriores. La capacidad de desplazamiento de estos robots se logra mediante el uso de ruedas, lo que les confiere ventajas significativas en términos de simplicidad mecánica, eficiencia energética y control preciso del movimiento.

Por otro lado, el control de modelo predictivo (MPC) es una técnica avanzada de control automático que se ha convertido en una herramienta esencial para el seguimiento de trayectorias en robots móviles de ruedas. Esta metodología se basa en la creación de un modelo del sistema que puede predecir el comportamiento futuro del robot a partir de un conjunto de entradas posibles. En el contexto de los robots móviles, el MPC utiliza un modelo dinámico para calcular la mejor secuencia de acciones de control que guiarán al robot a lo largo de una trayectoria deseada. Lo que distingue al MPC de otras técnicas de control es su capacidad para anticipar futuros eventos y ajustar las acciones de control en consecuencia. El proceso comienza con la definición de una trayectoria objetivo que el robot debe seguir. Luego, el MPC resuelve un problema de optimización en un horizonte de tiempo finito, considerando las restricciones del modelo y las limitaciones físicas del robot. El resultado es una serie de comandos de control óptimos que se aplican durante un intervalo de tiempo corto. Después de cada intervalo, el proceso se repite, utilizando la información más reciente sobre el estado del robot y el entorno.

En ese sentido este trabajo propone un control predictivo por modelo para el seguimiento de trayectoria, sin considerar restricciones.

2. Modelo del robot móvil tipo diferencial

En la robótica móvil, la locomoción diferencial se caracteriza por la presencia de dos ruedas motrices en la estructura mecánica del robot. Estas ruedas son comúnmente impulsadas por motores de corriente continua (CD). La movilidad del chasis del robot se logra mediante la variación de velocidad entre ambas ruedas. Para ilustrar esto, se puede observar un ejemplo de un robot móvil con locomoción diferencial en la Fig. 1.

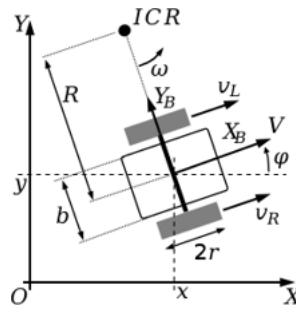


Figura 1 Robot móvil tipo diferencial.

donde las variables V y ω corresponden a las velocidades lineal y angular. El ángulo θ representa la orientación del robot en relación al eje X . El término r se refiere al radio de ambas ruedas, izquierda y derecha, y b es la separación entre las ruedas. El punto (x, y) indica la ubicación específica de interés en el robot. Con estos elementos en mente, se establece el modelo cinemático para un robot de tracción diferencial de la siguiente forma [1]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -L \sin \varphi \\ \sin \varphi & L \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Para abordar la limitación del modelo cinemático mostrado en la ecuación (1), donde las entradas de control V y ω no se corresponden completamente con las velocidades generalizadas \dot{q} proponemos un ajuste. Al desplazar el punto de interés del robot colinealmente con el vector V por una distancia L , definimos un nuevo punto de interés con las coordenadas (x_r, y_r) . Este cambio nos permite formular un modelo cinemático revisado que se expresa en función de este nuevo punto de referencia y modelarlo de la siguiente manera:

$$(\varphi).$$

La matriz que se encuentra en la ecuación (6) es conocida como la matriz jacobiana, la cual es invertible y puede ser representada por J .

3. Control predictivo por modelo para el seguimiento de trayectoria

La tarea de seguimiento de trayectoria es esencial en el ámbito de los robots móviles de ruedas. El propósito de esta tarea es lograr que el robot se adhiera a una trayectoria definida en el plano y que esté parametrizada temporalmente, lo que significa que el punto de interés del robot (x_r, y_r) debe seguir a una trayectoria deseada $(x_d(t), y_d(t))$ a lo largo del tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior esta sección presenta el diseño de un control de seguimiento de trayectoria, para este propósito se emplea la técnica de control predictivo por modelo. Esta técnica involucra las siguientes características:

- El controlador hace uso del modelo para predecir la evolución del sistema en procesos futuros.
- El controlador hace uso de una función de costo o función objetivo para minimizar los errores.
- Integra diversas técnicas como: control óptimo, procesos multivariables y control de procesos con tiempos muertos.

La estructura básica de un control predictivo por modelo que no considera restricciones, se detalla a profundidad en la Fig. 2.

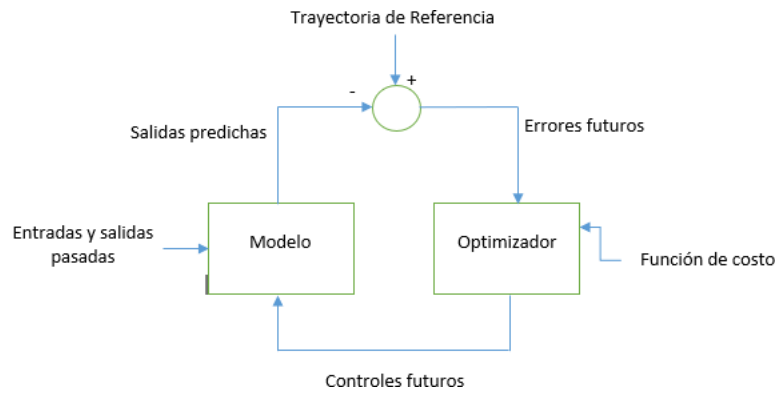


Figura 2 Estructura fundamental de un controlador predictivo por modelo sin restricciones.

Ahora, teniendo en cuenta la estructura de un controlador predictivo por modelo, el cual se detalla en la Fig. 2. Es necesario definir la trayectoria de referencia, la cual se define por la siguiente ecuación:

$$S_d = \begin{bmatrix} x_d(t) \\ y_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1t \\ 2\cos(0.3t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Toda vez que se ha definido la trayectoria de referencia, la acción a tomar es definir la función de costo que tendrá por objetivo ser optimizada, tomado a consideración la trayectoria deseada definida en (3), la función de costo se define como:

$$\sum_{k=1}^M (S_d(i+k) - S(i+k))^2 \quad (4)$$

donde M es el horizonte de muestras empleado en el controlador, S es la posición del robot móvil con ruedas, la cual se obtiene mediante la integración numérica del modelo cinemático definido en (2). Finalmente, i indica el estado i -ésimo del tiempo, el cual es discretizado en muestras.

Considerando la función descrita por (4), es necesario considerar un optimizador para optimizar la función en todo tiempo i . Para propósitos de este trabajo, emplearemos el optimizador *fmincon*, el cual está integrado en el software Matlab, los detalles de la simulación se muestran en la siguiente Sección.

4. Simulación

El propósito de esta sección es presentar los resultados alcanzados con el control propuesto en la sección 3. Estos se han obtenido mediante simulaciones realizadas utilizando el software Matlab. A continuación, se detallan los parámetros utilizados en dichas simulaciones:

$$M = 6, t = 28 \text{ s}, i = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Con respecto a los resultados de las simulaciones numéricas se muestran en la Fig. 3 y la Fig. 4. Específicamente, la Fig. 3 muestra el resultado del controlador de seguimiento de trayectoria. Por otro lado, la Fig. 4 muestra los errores cartesianos.

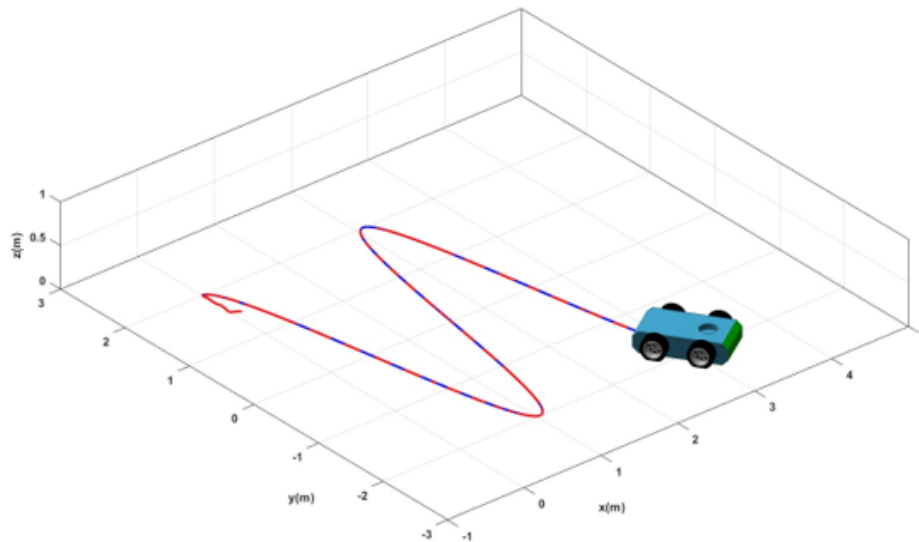


Figura 3 Desempeño del controlador de trayectoria vía control predictivo por modelo.

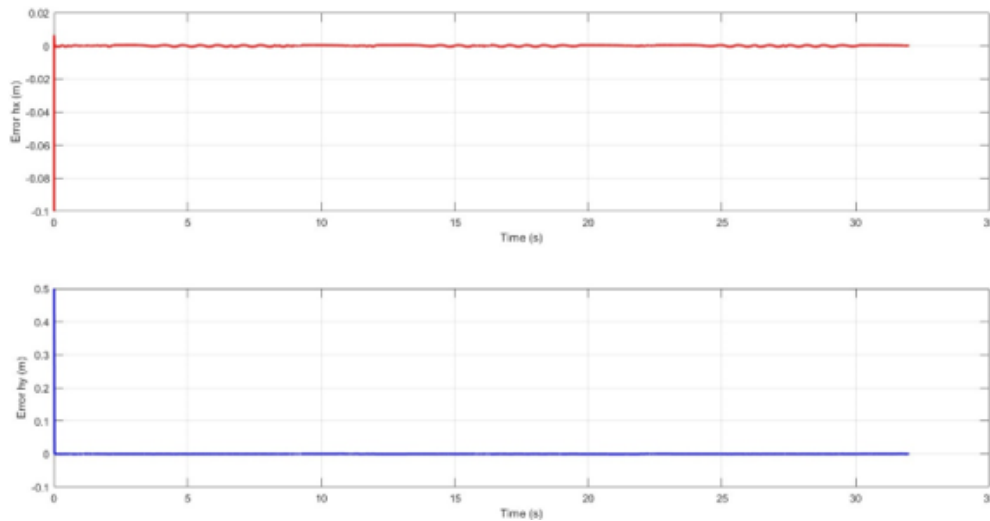


Figura 4 Perfiles de errores cartesianos.

Como se puede observar en la Fig. 3, el controlador cumple de manera correcta la trayectoria deseada, cumpliendo su objetivo. Además, la Fig. 4 muestra que los errores cartesianos tienden a cero.

5. Conclusiones

Este trabajo presentó un control predictivo por modelo para un robot móvil con ruedas tipo diferencial. El controlador cumplió el objetivo de control y dio solución al problema de seguimiento de trayectoria. En trabajos futuros se plantea la integración de restricciones en el optimizador para lograr entradas de control más suaves.

Referencias

- [1] Reyes, E., García, R., Orta, A., Silva, R., Marciano, M. & Mendoza, E. (marzo-abril 2023). Control de posición saturado para un robot móvil con ruedas tipo diferencial. *Boletín UPIITA*. 17 (95). <https://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/1038-cyt-numero-95/2147-control-de-posicion-saturado-para-un-robot-movil-con-ruedas>

Reyes Reyes, E., García Chavez, R. E., Orta Quintana, Á. A., Silva Ortigoza, R., Marciano Melchor, M., Santiago

Nogales, S. E. (2026). CONTROL PREDICTIVO POR MODELO PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA EN UN ROBOT MÓVIL DE RUEDAS TIPO DIFERENCIAL. *Boletín UPIITA. año XX, (NÚM) 2026.*