

Control por modos deslizantes para un sistema maestro-esclavo con restricciones Sliding mode control for a constrained master-slave system

L. Añorve ^{a,*}, R. García-Leal ^b, M. Ballesteros ^c, D. Cruz-Ortiz ^d

^aCentro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo, Instituto Politécnico Nacional, C.P. 07700, Ciudad de México, México.

^bEscuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, C.P. 45201, Jalisco, México.

^cLaboratorio de Robótica Médica y Bioseñales - UPIBI y CIDETEC, Instituto Politécnico Nacional, C.P. 07700, Gustavo A. Madero, Ciudad de México.

^dLaboratorio de Robótica Médica y Bioseñales - UPIBI, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto, La Laguna Ticomán, Gustavo A. Madero, C.P. 07340, Ciudad de México, México.

Resumen

El presente documento describe el desarrollo de un control para un sistema maestro-esclavo compuesto por un joystick físico con dos grados de libertad (sistema maestro) y su gemelo virtual (sistema esclavo). Se implementó un control robusto basado en modos deslizantes con la finalidad de que el joystick virtual realice el seguimiento de trayectoria proporcionada por el joystick maestro. El principal enfoque de este trabajo es la implementación de un algoritmo de control que considera restricciones de posición variantes en tiempo para asegurar que el dispositivo esclavo se mantenga en una zona de trabajo específica y así mejorar la interacción hombre-máquina. Se realizaron simulaciones para comprobar el funcionamiento del sistema, se comparó el control propuesto con un control por modos deslizantes de primer orden. Acorde a los resultados obtenidos, se evidenció que cuando se implementa el esquema de control con restricciones propuesto se garantiza el cumplimiento de las restricciones.

Palabras Clave: Control por modos deslizantes, Restricciones variantes en tiempo, Sistema maestro-esclavo.

Abstract

This document describes the development of a control for a master-slave system composed of a physical joystick with two degrees of freedom (master system) and its virtual twin (slave system). A robust control based on sliding modes fundamentals has been implemented for the virtual joystick to ensure trajectory tracking. The main contribution of this work is the implementation of a control algorithm that considers time-varying position constraints to ensure that the slave device remains in a specific workspace and thus improves human-machine interaction. Simulations were carried out to verify the operation of the system. The proposed control was compared with a first-order sliding mode control. According to the obtained results, it is evident that when the proposed control scheme was implemented, the fulfillment of the proposed position constraints is satisfied.

Keywords: Sliding mode control, Time-varying constraints, Master-slave system.

1. Introducción

El proceso en el que las personas interactúan con los objetos físicos, es decir, manipularlos y sentir sus características como la forma, textura, temperatura, entre otros, se conoce como háptica humana (Alur *et al.*, 2014). La tecnología háptica ha avanzado en este último siglo, dado que este tipo de tecnología tiene la capacidad de sensar el movimiento del usuario para manipular algún dispositivo físico y/o virtual y retroalimentarlo aplicando fuerza, calor o alguna vibración al usuario mediante algún actuador, simulando así la háptica humana (Shazhaev *et*

al., 2023; Huisman, 2017).

Las sensaciones que se pueden percibir se dividen de manera general en kinestésicas y táctiles. Las primeras proporcionan un panorama sobre la posición de los objetos en un espacio; las segundas proveen información sobre las texturas, formas y temperatura de un objeto (El Rassi y El Rassi, 2020). Con lo anterior, la háptica ha sido de gran utilidad en aplicaciones remotas o de teleoperación enviando retroalimentación en tiempo real al usuario. La manera en que el usuario realiza la interacción de un objeto físico con otro objeto virtual o físico utilizando háptica es mediante una Interfaz Humano-Máquina (I-HM). En

*Autor para correspondencia: luis.bernardo.jmnz@gmail.com

Correo electrónico: luis.bernardo.jmnz@gmail.com (Luis Bernardo Añorve Jimenez), rodericogarcia@outlook.com (Roderico Alfredo García Leal), ballesteros_mar@hotmail.com (Mariana Felisa Ballesteros Escamilla), cuod.cruz.ortiz@gmail.com (David Cruz Ortiz).

Historial del manuscrito: recibido el 02/07/2023, última versión-revisada recibida el 28/08/2023, aceptado el 21/08/2023, publicado el 30/11/2023. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial4.11409>



este punto, es importante resaltar que uno de los elementos o sistemas más comúnmente utilizados para la interacción en ambientes virtuales son los joysticks y los manipuladores robóticos (Giri *et al.*, 2021).

Gracias a la tecnología de realidad virtual (VR por sus siglas en inglés) y realidad aumentada (AR por sus siglas en inglés), la tecnología háptica ha incrementado su uso en distintas áreas como: los videojuegos y el entretenimiento. Sin embargo, también ha tenido impacto en áreas como la educación, al diseñar dispositivos para mejorar la comprensión de algunos conceptos, además de aplicarse en educación a distancia; y la medicina al diseñar simuladores para procedimientos médico-quirúrgicos, cirugía remota, robots de rehabilitación, entre otros (Shazhaev *et al.*, 2023).

Hoy en día, la implementación de la tecnología háptica en el área de la medicina tiene distintas problemáticas entre las que resalta la seguridad de los sistemas, haciendo referencia a la estabilidad o la transparencia, que son afectadas por factores como problemas en la transmisión de datos o perturbaciones causadas por el ambiente o el usuario (Giri *et al.*, 2021; Pacchierotti *et al.*, 2015). En este sentido, distintos investigadores han propuesto diversos esquemas de control bilateral para mejorar la estabilidad y la transparencia del sistema háptico, donde se han utilizado técnicas como algoritmos de dispersión o control pasivo (Pacchierotti *et al.*, 2015).

En este punto, es importante mencionar que el tipo de sistemas mencionados son susceptibles a perturbaciones externas o incertidumbres que afectan su dinámica y normalmente son representados como sistemas dinámicos de segundo orden. De acuerdo con (Kern *et al.*, 2023), para afrontar las perturbaciones e incertidumbres, es necesario utilizar controles no lineales como los esquemas basados en los fundamentos de modos deslizantes o esquemas adaptables, entre otros.

En el trabajo (Davila, 2013), se desarrolla un control basado en un esquema de back-stepping utilizando modos deslizantes para afrontar las perturbaciones que afectan al sistema, el control propuesto asegura una convergencia exponencial incluso cuando distintos tipos de perturbaciones afectan al sistema. En (Sun *et al.*, 2019), afrontan el control de sistemas con perturbaciones desarrollando un esquema de control utilizando redes neuronales y back-stepping con ganancias adaptables empleando un diferenciador por modos deslizantes.

En los trabajos (Saini *et al.*, 2022) y (Oh *et al.*, 2013), se propone el desarrollo de sistemas hápticos basados en un sistema maestro-esclavo (SM-E), donde se implementan controles por modos deslizantes (CMD) para el seguimiento del dispositivo esclavo. Una de las desventajas comunes en los CMD es el efecto conocido como *chattering* (Obeid *et al.*, 2018; Kern *et al.*, 2023). A pesar de las ventajas que proporcionan los CMD, ninguno de los trabajos mencionados consideran la inclusión de restricciones en los estados en las leyes de control. Es importante mencionar que en muchos casos, los SM-E tienen restricciones intrínsecas debido a su naturaleza mecatrónica, por tanto, el desarrollo e implementación de controles que consideren en su estructura matemática la inclusión de restricciones en los estados permitiría mejorar significativamente el desempeño en cuanto seguimiento de trayectoria de los SM-E.

En este trabajo se propone la implementación de un esquema de control por modos deslizantes con restricciones (CMDR)

para un SM-E conformado por un joystick físico y su gemelo virtual. La propuesta de este control se enfoca en que el sistema virtual realice el seguimiento de una trayectoria proporcionada por el sistema maestro o bien generada de forma artificial por el usuario emulando las trayectorias del sistema maestro pero manteniéndose en un espacio de trabajo delimitado por barreras variantes en tiempo. Las principales contribuciones de este trabajo, son las siguientes:

- Se propone el diseño de un sistema mecatrónico que emula un joystick de dos grados de libertad.
- Se diseñó un gemelo virtual de un joystick de dos grados de libertad para conformar un sistema robótico maestro-esclavo.
- Se diseñó e implementó un esquema de control robusto que garantiza el seguimiento de trayectoria entre el sistema maestro y su gemelo virtual, al mismo tiempo que asegura el cumplimiento de restricciones de posición en el gemelo virtual.

El resto del escrito está estructurado de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe el tipo de sistema que se contempla en el desarrollo de este trabajo. La Sección 3 presenta el planteamiento del problema que se busca resolver con el esquema de control propuesto. Las ecuaciones matemáticas que describen el diseño del controlador se presentan en la Sección 4. Los resultados obtenidos y el análisis se muestra en la Sección 5 del documento. Finalmente, las conclusiones del trabajo se presentan en la Sección 6.

Notación. En este estudio el conjunto de los números reales está definido como \mathbb{R} . \mathbb{R}^n es el espacio vectorial de n elementos. Para una matriz $X \in \mathbb{R}^{n \times m}$, su transpuesta está denotada por $X^T \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Para un vector $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ la norma Euclidiana está definida como $\|x\|$.

2. Descripción del sistema maestro-esclavo

El sistema considerado en el desarrollo de este trabajo es un joystick de dos grados de libertad (GDL) como el que se muestra en la Figura 1.

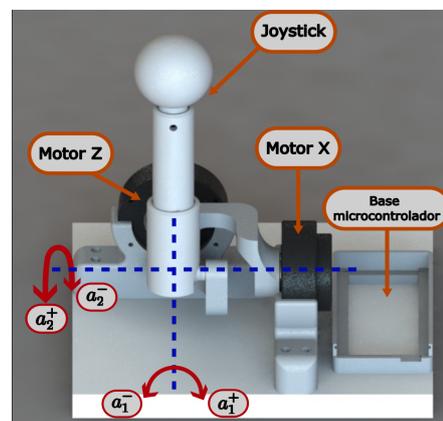


Figura 1: Modelo CAD del sistema joystick.

En el sistema considerado la posición angular del dispositivo está descrita por $a_1 \in \mathbb{R}$ y $a_2 \in \mathbb{R}$, respectivamente. En este caso particular, se considera que el joystick tiene restricciones mecánicas intrínsecas descritas por $a_i^+ \in \mathbb{R}$ y $a_i^- \in \mathbb{R}$ que denotan el límite superior e inferior de operación en el i -ésimo GDL con $i = \{1, 2\}$. Empleando el método de variables de estado, se introducen las variables $\phi_{1,i} \in \mathbb{R}$ y $\phi_{2,i} \in \mathbb{R}$ con $\phi_{1,i} = a_i$ y $\phi_{2,i} = \dot{a}_i$. Por tanto, cada GDL del joystick se puede representar por una ecuación diferencial de segundo orden dada por

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_{1,i}(t) &= \phi_{2,i}(t), \\ \dot{\phi}_{2,i}(t) &= f_i(\phi_{1,i}, \phi_{2,i}, t) + \mu_i(\phi_{1,i}, \phi_{2,i}, t)u_i(t), \\ y_i(t) &= \phi_{1,i}(t),\end{aligned}\quad (1)$$

donde $f_i: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ es una función no lineal desconocida que representa la función de desplazamiento del sistema, que se asume localmente Lipschitz, $\mu_i: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^{2 \times 2}$ representa la función de entrada asociada al control que se asume es invertible para todo $t \geq 0$.

La señal de control para el i -ésimo GDL del sistema está representado por $u_i \in \mathbb{R}$, mientras que la salida del sistema está representada por $y_i \in \mathbb{R}^n$ que existe para todo $t \geq 0$.

3. Planteamiento del problema de control

Considere los vectores $\gamma_S \in \mathbb{R}^n$ y $\gamma_I \in \mathbb{R}^n$ compuestos por funciones no lineales continuas y diferenciables que representan las barreras asimétricas variantes en tiempo para que la salida del sistema se mantenga en los límites de operación del estado ϕ_1 . Cada vector γ_S y γ_I satisfacen la siguiente estructura

$$\gamma_p(t) = [\gamma_{p,1}(t), \dots, \gamma_{p,j}(t)], \quad (2)$$

donde cada componente $\gamma_{p,j}$ con $p = \{S, I\}$ y $j = \{1, \dots, n\}$, representa los valores máximos ($p = S$) y mínimos ($p = I$), límites de operación del j -ésimo elemento del estado ϕ_1 .

Para definir los límites de operación del sistema descrito en (1), se asumió como válida la siguiente suposición.

Suposición 1. Existe una constante positiva $\kappa_j > 0$ tal que $v_j = \frac{\rho_j}{\iota_j}$, con $\rho_j = \min(|\gamma_{S,j}(t) - \phi_{1,j}(t)|, |\gamma_{I,j}(t) - \phi_{1,j}(t)|)$ e $\iota_j = \kappa_j + \min(|\gamma_{S,j}(t) - \phi_{1,j}(t)|, |\gamma_{I,j}(t) - \phi_{1,j}(t)|) \in (0, 1) \forall t \geq 0$ con $\phi_{1,j}$ representando el j -ésimo elemento del vector ϕ_1 .

Ahora, definamos el siguiente espacio vectorial $\Phi^* \in \mathbb{R}^{2n}$ que satisface la condición de Lipschitz. Siendo $\Phi^* = [\varphi_1^{*T} \quad \varphi_2^{*T}]^T$ con $\varphi_1^* \in \mathbb{R}^n$ siendo un conjunto de funciones diferenciables que representan la posición deseada para el estado ϕ_1 y con $\varphi_2^* \in \mathbb{R}^n$ siendo la derivada respecto al tiempo de φ_1^* .

El objetivo principal es que el control diseñado permita que para cada componente $\phi_{1,j}$ con $j = \{1, 2\}$ del estado ϕ_1 siga la trayectoria deseada dada por $\varphi_{1,j}^*$ manteniéndose dentro de unas barreras variantes en tiempo predefinidas dadas por $\gamma_{p,j}$ que representan los límites de operación del sistema. Lo anterior se puede reformular de la siguiente manera

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\phi_{1,j}(t) - \varphi_{1,j}^*(t)\| = 0, \quad (3)$$

tal que se cumplan las siguientes restricciones variantes en tiempo a la salida

$$\gamma_{I,j}(t) < \phi_{1,j}(t) < \gamma_{S,j}(t), \quad \forall t \geq 0. \quad (4)$$

4. Algoritmo de control

Considere el sistema descrito en (1), este sistema se puede reescribir como se muestra a continuación

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_{1,j}(t) &= \phi_{2,j}(t), \\ \dot{\phi}_{2,j}(t) &= f_j(\phi_{1,j}, \phi_{2,j}, t) + \mu_j(\phi_{1,j}, \phi_{2,j}, t)u_j(t),\end{aligned}\quad (5)$$

donde $\phi_{1,j}$ y $\phi_{2,j}$ representan los estados. f_j y μ_j son las funciones no lineales asociadas a los estados y u_j es la señal de control. El error de seguimiento entre los estados de (5) y el j -ésimo subconjunto de $\Phi_j^* \in \mathbb{R}^2$ se representa de la siguiente manera

$$e_j(t) = \Phi_j(t) - \Phi_j^*(t), \quad (6)$$

donde $\Phi_j = [\phi_{1,j}^T \quad \phi_{2,j}^T]^T$ y $e_j = [e_{1,j} \quad e_{2,j}]^T$ con $e_{1,j}$ y $e_{2,j}$ dados por $e_{1,j}(t) = \phi_{1,j}(t) - \varphi_{1,j}^*(t)$ y $e_{2,j}(t) = \phi_{2,j}(t) - \varphi_{2,j}^*(t)$, respectivamente.

La derivada respecto al tiempo de (6) satisface

$$\begin{aligned}\dot{e}_{1,j}(t) &= e_{2,j}(t), \\ \dot{e}_{2,j}(t) &= f_j(\phi_{1,j}, \phi_{2,j}, t) + \mu_j(\phi_{1,j}, \phi_{2,j}, t)u_j(t) - \dot{\varphi}_{2,j}^*(t).\end{aligned}\quad (7)$$

Una vez que la dinámica no lineal del error de seguimiento se representa como un conjunto de n subsistemas de segundo orden, se procede a realizar el diseño del algoritmo de control.

Inspirados en el diseño del CMD descrito en Cruz-Ortiz et al. (2022), se propone la siguiente ley de control como una variante del trabajo mencionado. Entonces, considere la siguiente estructura matemática

$$u_j(t) = -\eta_j(t) \text{sign}(v_j(t)), \quad (8)$$

donde $v \in \mathbb{R}^n$ define la superficie de deslizamiento con $v = [v_1, v_2, \dots, v_j]^T$, cada elemento del vector satisface que $v_j = e_{1,j}(t) + \alpha_j e_{2,j}(t)$ donde $\alpha_j \in \mathbb{R}^+$ es una constante positiva diferente de cero que define la velocidad de convergencia del error de seguimiento. En (8), η_j representa una ganancia adaptativa definida como $\eta_j = (\Lambda_j + \xi_j(t))\alpha_j^{-1}$ donde Λ_j es una constante positiva y ξ_j es una función sigmoide descrita por $\xi_j(t) = \xi_j^+(1 + \exp^{-\psi_j v_j})^{-1}$ con $\xi_j^+ \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}$ s.t. $0 \leq \xi_j(t) \leq \xi_j^+$ y $\psi_j \in \mathbb{R}^-$.

Comentario. Note que no se presenta una prueba detallada del diseño del controlador. Sin embargo, un enfoque similar puede ser consultado por el lector en Cruz-Ortiz et al. (2022), donde el lector puede obtener una perspectiva general del diseño y prueba de estabilidad del controlador.

Una vez se propone el esquema de control como en (8), se procede a realizar la implementación en el modelo de joystick virtual. Para tal fin, se propone de forma general la metodología descrita en el diagrama de la Figura 2.

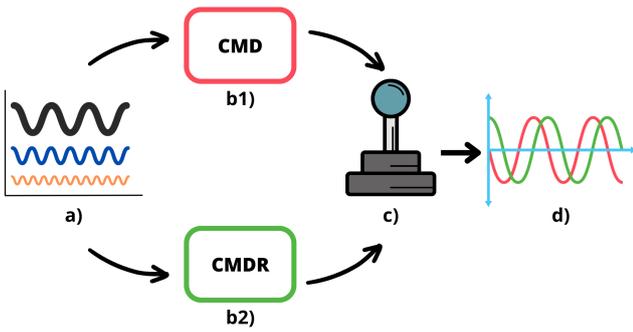


Figura 2: Etapas de la metodología considerada en la implementación del control. a) Señales de referencias, b1) Esquema CMD, b2) Esquema CMDR, c) Joystick virtual, d) Gráfica comparativa.

El primer paso para la implementación del algoritmo de control sugiere el diseño de las trayectorias de referencia y las barreras virtuales. Note que en este punto las trayectorias de referencia pueden provenir de un sistema maestro, o bien, pueden ser diseñadas por el usuario (Ver Figura 2a). Posteriormente, con el objetivo de validar el funcionamiento del algoritmo de control propuesto, se propone la implementación del algoritmo de control con restricciones (CMDR) y un CMD de primer orden (Ver Figura 2b). Ambos esquemas se implementan en el sistema de joystick virtual representado en la sección c) de la Figura 2. Finalmente, para evidenciar las diferencias en los comportamientos obtenidos con ambos controladores se generaran las gráficas que describen el seguimiento de trayectoria cuando ambos controladores son implementados en el sistema virtual.

5. Resultados experimentales

En la Figura 3 se observa el joystick virtual al cual se le aplicará el control propuesto; el sistema comprende 2 GDL que están conformados por dos juntas rotacionales colocadas perpendicularmente. El ambiente virtual fue desarrollado en Simulink utilizando el ambiente de Simscape Multibody. Todo el programa para el control fue desarrollado en Simulink.

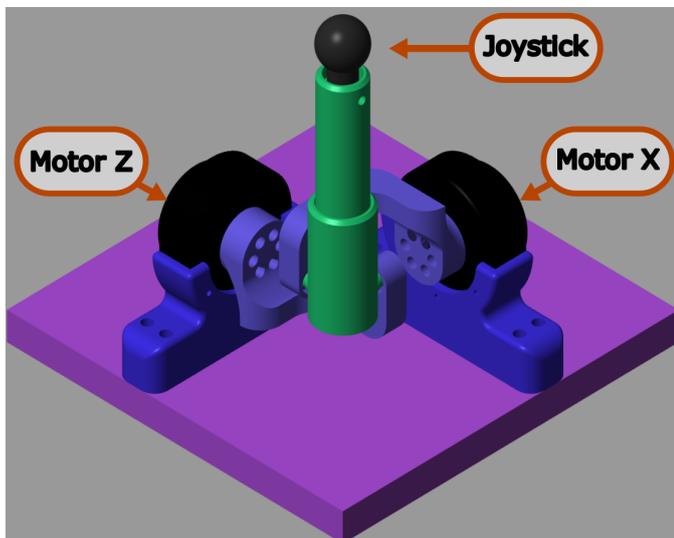


Figura 3: Joystick virtual para pruebas experimentales.

En el ambiente virtual se configuró el solucionador de Runge-Kutta con un paso de 0.001 s. En la Tabla 1 se muestran las ganancias del control utilizadas para cada grado de libertad.

Tabla 1: Ganancias del control.

Ganancias	Valor $\phi_{1,1}$	Valor $\phi_{1,2}$
κ_j	0.01	0.01
α_j	0.09	0.1
ξ_j^+	6	6
ψ_j	-5	-8

5.1. Seguimiento de trayectoria

Se propuso una trayectoria de tal manera que el joystick realizara un movimiento circular, para ello al ángulo $\phi_{1,1}$ se le proporcionó una referencia compuesta por una señal senoidal con una frecuencia de 5 rad/s y al ángulo $\phi_{1,2}$ la misma señal, pero desfasada $\pi/2$.

Las señales que componen a las barreras de posición son señales senoidales con la misma amplitud. Para el ángulo $\phi_{1,1}$ la barrera superior γ_S es una señal senoidal con una amplitud de 0,05 y una frecuencia de 8 rad/s; para la barrera inferior γ_I la frecuencia fue de 3 rad/s. El ángulo $\phi_{1,2}$ tenía las mismas barreras pero invertidas, es decir, la barrera superior de $\phi_{1,1}$ es la barrera inferior de $\phi_{1,2}$.

En las Figuras 4 y 6 se observa el seguimiento de trayectoria de los ángulos $\phi_{1,1}$ y $\phi_{1,2}$ respectivamente. En ambos casos el CMD garantiza el seguimiento de trayectoria, con un sobretiro en el ángulo $\phi_{1,1}$. Por otro lado, el CMDR en ambos GDL garantiza el seguimiento de trayectoria deseada respetando las barreras propuestas. En este punto, es importante resaltar, que cuando uno de los estados se aproxima a la barrera, el esquema de control propuesto evita que la barrera sea sobrepasada.

Note que en las Figuras 5 y 7 se evidencia con un acercamiento la presencia del fenómeno conocido como *chattering*. Este fenómeno, esta implícito cuando se implementa un esquema de control basado en los fundamentos de los modos deslizantes. Sin embargo, para la aplicación propuesta en este trabajo, el fenómeno mencionado, no representa una desventaja pues el CMD regula únicamente el seguimiento de trayectoria del sistema virtual.

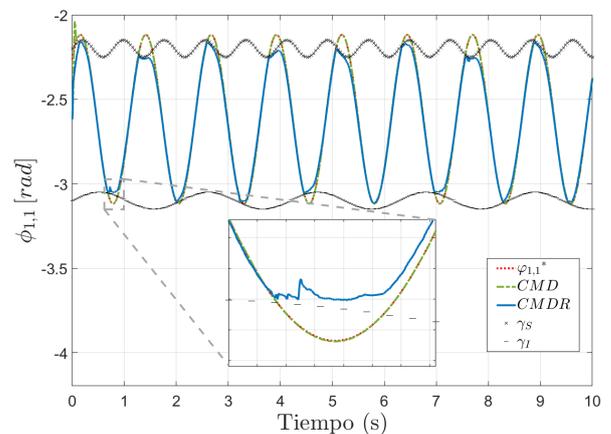


Figura 4: Seguimiento de trayectoria de $\phi_{1,1}$ comparando CMD y CMDR.

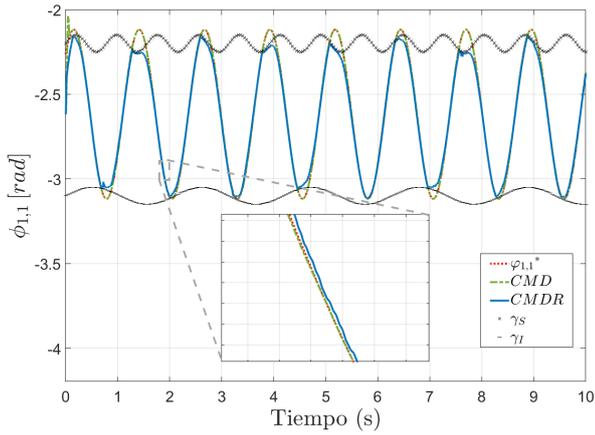


Figura 5: Acercamiento al seguimiento de trayectoria de $\phi_{1,1}$ comparando CMD y CMDR, donde se puede apreciar la presencia del fenómeno de *chattering*.

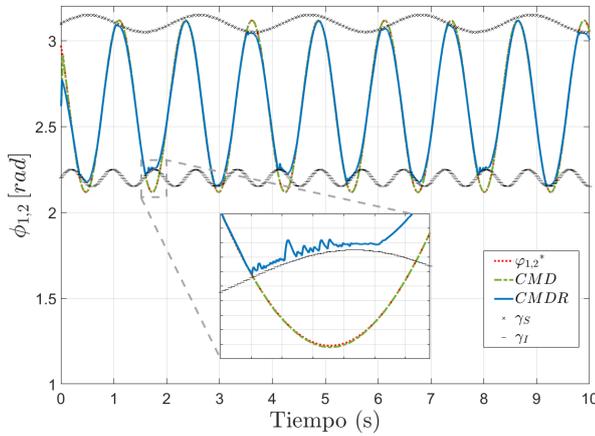


Figura 6: Seguimiento de trayectoria de $\phi_{1,2}$ comparando CMD y CMDR.

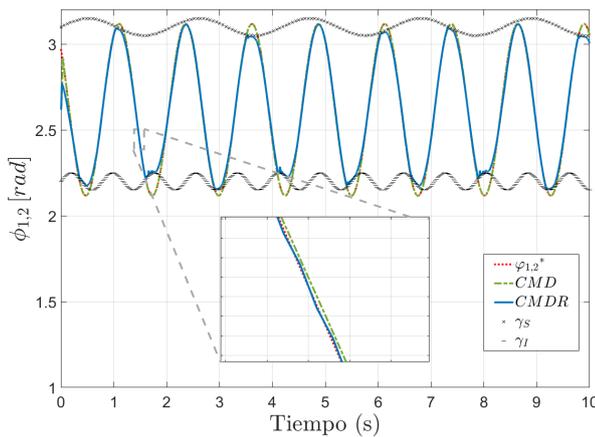


Figura 7: Acercamiento al seguimiento de trayectoria de $\phi_{1,2}$ comparando CMD y CMDR, donde se puede apreciar la presencia del fenómeno de *chattering*.

Considerando que el sistema virtual no tiene actuadores físicos que pudieran sufrir un sobrecalentamiento debido a este fenómeno y además, el sistema virtual no considera restricciones frecuenciales en cuanto a la señal de control que regula sus movimientos se puede concluir que la presencia del fenómeno

chattering en el control del modelo virtual no representa una desventaja.

En las Figuras 8 y 9 se muestran las señales de control de $\phi_{1,1}$ y $\phi_{1,2}$ respectivamente. En dichas figuras, se evidencia el efecto del controlador propuesto, mostrando un mayor consumo energético cuando el sistema se aproxima a las barreras.

El error de seguimiento se muestran en las Figuras 10 y 11. El error para el CMDR no se mantiene en cero debido a que cuando la referencia sale de las barreras la señal no realiza el seguimiento causando que el error aumente. Sin embargo, cuando la referencia regresa a la zona de trabajo el error converge a cero.

En la Figura 12 se observa la norma del error de ambos controles. De esta figura se puede apreciar que ambos controles convergen a una región cercana a cero en menos de 0,5 segundos. La norma del error obtenida con el CMD converge a una cota menor en comparación con el esquema propuesto. Sin embargo, este efecto se debe al cumplimiento de las restricciones de posición por parte del CMDR.

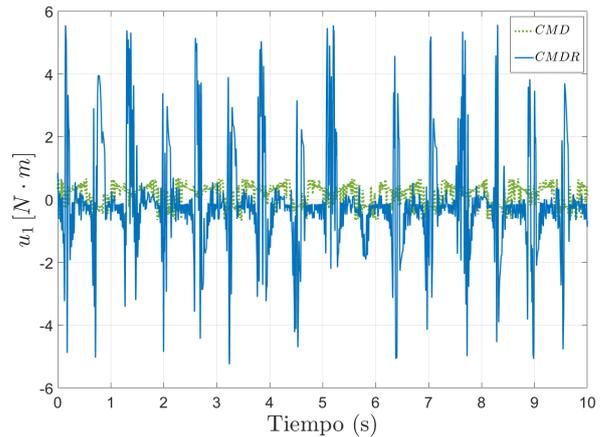


Figura 8: Señal de control u_1 comparando CMD y CMDR.

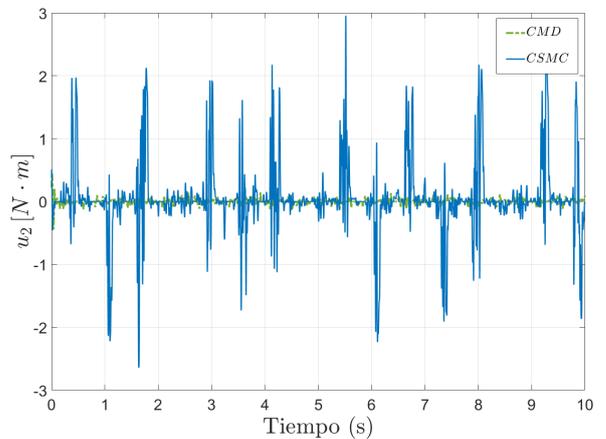


Figura 9: Señal de control u_2 comparando CMD y CMDR.

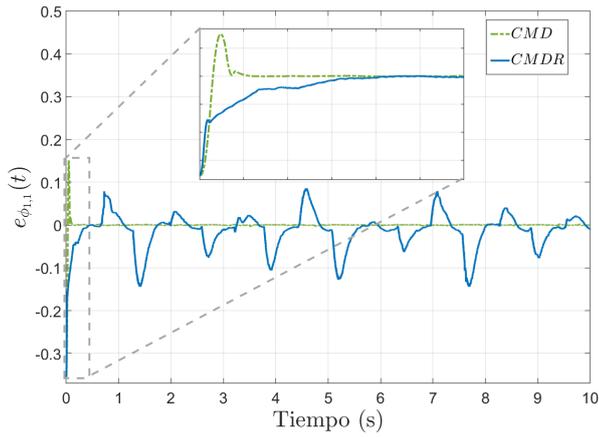


Figura 10: Error de seguimiento de $\phi_{1,1}$ comparando CMD y CMDR.

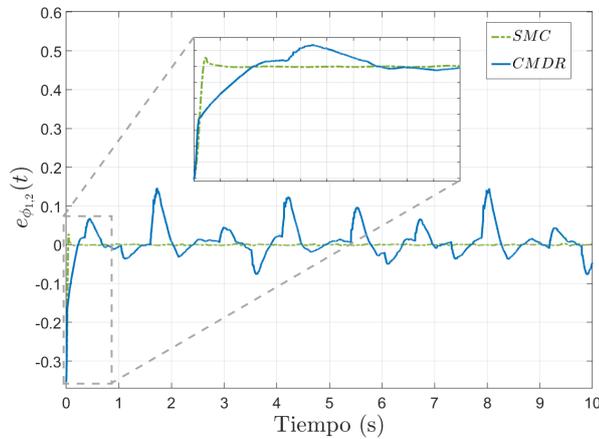


Figura 11: Error de seguimiento de $\phi_{1,2}$ comparando CMD y CMDR.

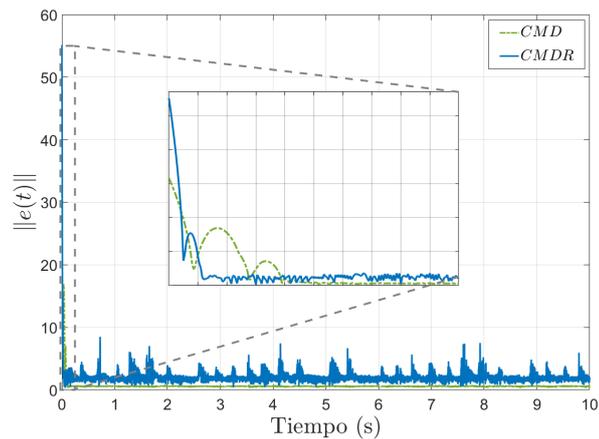


Figura 12: Norma del error de seguimiento comparando CMD y CMDR.

6. Conclusiones

El control propuesto garantiza el seguimiento de trayectoria al mismo tiempo que satisface las restricciones propuestas para que el sistema esclavo se mantenga dentro de un área de trabajo predefinida. La norma del control con restricciones converge en menor tiempo que el CMD mostrando que el control propuesto permite un mejor seguimiento de trayectoria, además de respetar las barreras en la posición.

Referencias

- Alur, A., Shrivastav, P., y Jumde, A. (2014). Haptic technology: a comprehensive review of its applications and future prospects. *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, 5:6039–6043.
- Cruz-Ortiz, D., Chairez, I., y Poznyak, A. (2022). Adaptive sliding-mode trajectory tracking control for state constraint master–slave manipulator systems. *ISA transactions*, 127:273–282.
- Davila, J. (2013). Exact tracking using backstepping control design and high-order sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(8):2077–2081.
- El Rassi, I. y El Rassi, J.-M. (2020). A review of haptic feedback in teleoperated robotic surgery. *Journal of medical engineering & technology*, 44(5):247–254.
- Giri, G. S., Maddahi, Y., y Zareinia, K. (2021). An application-based review of haptics technology. *Robotics*, 10(1):29.
- Huisman, G. (2017). Social touch technology: A survey of haptic technology for social touch. *IEEE transactions on haptics*, 10(3):391–408.
- Kern, T. A., Hatzfeld, C., y Abbasimoshaei, A. (2023). *Engineering haptic devices*. Springer.
- Obeid, H., Fridman, L. M., Laghrouche, S., y Harmouche, M. (2018). Barrier function-based adaptive sliding mode control. *Automatica*, 93:540–544.
- Oh, J., Shin, W., Uhm, C., Lee, S., Han, Y., y Choi, S. (2013). Control of haptic master–slave robot system for minimally invasive surgery (mis). *Journal of Physics: Conference Series*, 412(1):012041.
- Pacchierotti, C., Meli, L., Chinello, F., Malvezzi, M., y Prattichizzo, D. (2015). Cutaneous haptic feedback to ensure the stability of robotic teleoperation systems. *The International Journal of Robotics Research*, 34(14):1773–1787.
- Saini, S., Orlando, M. F., y Pathak, P. M. (2022). Adaptive control of a master–slave based robotic surgical system with haptic feedback. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 20(2):1125–1138.
- Shazhaev, I., Mihaylov, D., y Shafeeg, A. (2023). A review of haptic technology applications in healthcare. *Open Journal of Applied Sciences*, 13(2):163–174.
- Sun, H., Hou, L., Zong, G., y Yu, X. (2019). Adaptive decentralized neural network tracking control for uncertain interconnected nonlinear systems with input quantization and time delay. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 31(4):1401–1409.