

Teleoperación de un Manipulador Dual Móvil con Torso

Fernando A. Chicaiza

Instituto de Automática

Universidad Nacional de San Juan

San Juan, Argentina

fachicaiza@inaut.unsj.edu.ar

Emanuel Slawiński

Instituto de Automática

Universidad Nacional de San Juan

San Juan, Argentina

slawinski@inaut.unsj.edu.ar

Vicente Mut

Instituto de Automática

Universidad Nacional de San Juan

San Juan, Argentina

vmut@inaut.unsj.edu.ar

Abstract—La teleoperación de sistemas robóticos ofrece una forma de mejorar las capacidades humanas de manipulación y navegación en entornos peligrosos o inaccesibles. Los manipuladores móviles, que combinan la manipulación de un brazo robótico con la movilidad de un robot móvil, enfrentan desafíos al realizar tareas que requieren manipulación simultánea en múltiples puntos. Integrar un manipulador adicional puede abordar este desafío, mejorando la versatilidad del robot para realizar diversas tareas. Para controlar estos manipuladores, se pueden diseñar enfoques que los consideren como una cadena cerrada o que los controlen de manera independiente. Este trabajo propone un tipo de mapeo para controlar un robot seguidor complementario en una configuración de teleoperación bilateral. Se ejecuta un conjunto de experimentos donde un operador humano controla ambos dispositivos hapticos, generando referencias para controlar los efectores finales del manipulador móvil dual con torso. La implementación se realiza con el robot manipulador móvil dual simulador en Gazebo-ROS2, mientras se considera dos dispositivos hapticos Falcon-Novint y operadores humanos en el lazo de control.

Index Terms—Teleoperación, manipulador dual móvil, retraso.

I. INTRODUCCIÓN

La teleoperación de sistemas robóticos ofrece la posibilidad de ampliar las capacidades de manipulación y navegación humanas en diversas escalas, permitiendo la interacción con entornos peligrosos o inaccesibles [1]. Aunque los manipuladores móviles combinan las habilidades de manipulación de un brazo robótico con la movilidad de un robot móvil [2], aún pueden surgir desafíos al enfrentar tareas que requieren la manipulación simultánea en múltiples puntos [3]. Este obstáculo puede abordarse mediante la integración de un manipulador adicional, ya sea incorporado en la misma base móvil que el brazo principal o montado en una base de tipo torso compartida por ambos manipuladores. Esta configuración mejora la versatilidad del robot para llevar a cabo una variedad de tareas, como ensamblaje, captura, transporte y manipulación de objetos, entre otras [4].

Para el control de este par de manipuladores, pueden diseñarse dos enfoques comunes: considerar ambos brazos como una cadena cerrada a manipular o comandarlos de manera independiente. La primera opción está orientada a la interacción directa con un único objeto, donde los comandos de control se aplican a ambos manipuladores considerándolos

como una cadena cerrada en relación con el objeto de interacción y las acciones que el cuerpo debe ejecutar [5]. Por otra parte, el control de los efectores finales de cada brazo puede estar orientado a ejecuciones independientes de cada extremidad, compartiendo solo el desplazamiento de la plataforma móvil. Específicamente para este caso, se deben tener en cuenta tanto la forma de control del brazo primario como las consideraciones necesarias para comandar el brazo secundario, dado que este último puede tener restricciones debido a los grados de libertad compartidos [6].

Por otra parte, la teleoperación de robots con diferentes espacios de trabajo se aborda mediante dos enfoques: el mapeo de posición y el mapeo de velocidad [7]. Mientras que el mapeo de posición ajusta el espacio de trabajo del líder para coincidir con el de la tarea, enfrenta desafíos de resolución [8]. Por otro lado, el modo de velocidad permite al seguidor cubrir grandes espacios de trabajo, pero con limitaciones de estabilidad. Una solución propuesta combina ambos enfoques, considerando la transición entre modos como crucial para la estabilidad del sistema [9]. Se exploran métodos de transición discretos y continuos para mejorar el control.

Para nuestro trabajo, un robot líder primario (también referido como principal en todo este trabajo) genera referencias para un robot seguidor primario, mientras que el robot líder complementario (también conocido como secundario) debe generar referencias para controlar al robot seguidor secundario. Es importante destacar que consideramos al conjunto móvil/torso/manipulador-derecho como el robot remoto primario, mientras que el manipulador izquierdo empotrado sobre el torso es identificado como el robot seguidor complementario. Además, dos robots hapticos de tipo Novint-Falcon son los robots líderes primario y secundario. La experimentación se ejecuta considerando un único operador humano controlando ambos dispositivos hapticos, los cuales generan las referencias que controlan ambos efectores finales del manipulador móvil dual con torso. En los experimentos, el MMDT se encuentra en el sitio remoto enlazado a los robots locales a través de un canal de comunicación susceptible a retardos. Para emular al seguidor completo, una computadora dedicada corriendo ROS2 y Gazebo permite determinar el comportamiento del sistema de teleoperación completo, donde las velocidades de cada robot y los errores de coordinación

entre cada par de robots permiten analizarse.

II. ESQUEMA DE CONTROL

A. Esquema de Teleoperación Bilateral y Modelación Matemática

La Figura 1 ilustra el esquema completo de teleoperación bilateral, indicando ambos sitios y el canal de comunicación. De esta manera, esta sección presenta la representación matemática de ambos robots, controladores y el diseño de referencias para los modos de velocidad y posición.

1) *Modelación de los Robots:* Según el comportamiento dinámico [10] de los robots y utilizando modelado de Euler-Lagrange, los modelos dinámicos no lineales típicos para el líder y el seguidor primarios se definen como

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{mp}}(\mathbf{x}_{\text{mp}})\ddot{\mathbf{x}}_{\text{mp}} + \mathbf{C}_{\text{mp}}(\mathbf{x}_{\text{mp}}, \dot{\mathbf{x}}_{\text{mp}})\dot{\mathbf{x}}_{\text{mp}} + \mathbf{g}_{\text{mp}}(\mathbf{x}_{\text{mp}}) \\ = \mathbf{f}_{\text{mp}} + \mathbf{f}_{\text{hp}} \end{aligned} \quad (1)$$

y

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{sp}}(\mathbf{q}_{\text{sp}})\ddot{\mathbf{q}}_{\text{sp}} + \mathbf{C}_{\text{sp}}(\mathbf{q}_{\text{sp}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{sp}})\dot{\mathbf{q}}_{\text{sp}} + \mathbf{g}_{\text{sp}}(\mathbf{q}_{\text{sp}}) \\ = \boldsymbol{\tau}_{\text{sp}} + \mathbf{J}^T \mathbf{f}_{\text{ep}}, \end{aligned} \quad (2)$$

respectivamente; mientras que

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{ms}}(\mathbf{x}_{\text{ms}})\ddot{\mathbf{x}}_{\text{ms}} + \mathbf{C}_{\text{ms}}(\mathbf{x}_{\text{ms}}, \dot{\mathbf{x}}_{\text{ms}})\dot{\mathbf{x}}_{\text{ms}} + \mathbf{g}_{\text{ms}}(\mathbf{x}_{\text{ms}}) \\ = \mathbf{f}_{\text{ms}} + \mathbf{f}_{\text{hs}} \end{aligned} \quad (3)$$

y

$$\mathbf{M}_{\text{ss}}(\mathbf{x}_{\text{ss}})\ddot{\mathbf{x}}_{\text{ss}} + \mathbf{C}_{\text{ss}}(\mathbf{x}_{\text{ss}}, \dot{\mathbf{x}}_{\text{ss}})\dot{\mathbf{x}}_{\text{ss}} + \mathbf{g}_{\text{ss}}(\mathbf{x}_{\text{ss}}) = \mathbf{f}_{\text{ss}} + \mathbf{f}_{\text{es}} \quad (4)$$

representan el comportamiento de los extremos efectores secundarios del líder y del seguidor, respectivamente.

Para las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), \mathbf{M}_i son las matrices de inercia, \mathbf{C}_i son las matrices de fuerzas de Coriolis y centrípetas, y \mathbf{g}_i son los vectores gravitacionales, para los robots líder y seguidor, respectivamente. Además, para el robot remoto primario, $\mathbf{q}_{\text{sp}}(t)$, $\dot{\mathbf{q}}_{\text{sp}}(t)$ y $\ddot{\mathbf{q}}_{\text{sp}}(t)$ son la posición, velocidad y aceleración articulares del seguidor, respectivamente. Por otro lado, para el robot primario local, el robot secundario local y el robot secundario remoto, $\mathbf{x}_i(t)$, $\dot{\mathbf{x}}_i(t)$ y $\ddot{\mathbf{x}}_i(t)$ son la posición, velocidad y aceleración cartesianas de los extremos efectores de los robots, respectivamente; \mathbf{f}_{mi} es la fuerza aplicada al robot local; y \mathbf{f}_{hi} es la fuerza aplicada por el operador humano.

Además, $\boldsymbol{\tau}_s$ es el torque de control aplicado al robot remoto primario, \mathbf{f}_{ss} es el torque de fuerza aplicado al robot secundario remoto, y \mathbf{f}_{es} representa el comportamiento del entorno.

2) *Controladores:* En este trabajo, nos enfocamos en el mapeo que incluye mapeos de velocidad y no lineales y utilizamos esquemas de control cartesiano/articular [11] para los robots primarios, mientras que utilizamos esquemas de control tipo cartesiano/cartesiano. Basándonos en estructuras P+d para la teleoperación bilateral, los controladores utilizados para los robots primarios se expresan como

$$\mathbf{f}_{\text{mp}} = -k_{\text{mp}}(\mathbf{ref}_p(t-h_2)) - \alpha_{\text{mp}}\dot{\mathbf{x}}_{\text{mp}} + \mathbf{g}_{\text{mp}} \quad (5)$$

y

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{sp}} = k_p \mathbf{J}_D^\dagger (\mathbf{ref}_p(t-h_1) - \mathbf{x}_{\text{sp}}) - \alpha_{\text{sp}}\dot{\mathbf{q}}_{\text{sp}} + \mathbf{g}_{\text{sp}}; \quad (6)$$

con \mathbf{J}_D^\dagger definido como

$$\mathbf{J}_D^\dagger = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}_D^T (\mathbf{J}_D \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}_D^T)^{-1}, \quad (7)$$

donde $\mathbf{J}_D \in \mathbb{R}^{m \times n_p}$, con n_p siendo los grados de libertad del robot, y $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{n_p \times n_p}$ una matriz de ponderación.

Por otra parte, los controladores usados para los robots secundarios [12] se definen como

$$\mathbf{f}_{\text{ms}} = -\alpha_{\text{ms}}\dot{\mathbf{x}}_{\text{ms}} - k_{\text{ms}}(\mathbf{ref}_s(t-h_2)) + \mathbf{g}_{\text{ms}} \quad (8)$$

y

$$\mathbf{f}_{\text{ss}} = -\alpha_{\text{ss}}\dot{\mathbf{x}}_{\text{ss}} + k_{\text{ss}}(\mathbf{ref}_s(t-h_1) - \mathbf{x}_{\text{ss}}) + \mathbf{g}_{\text{ss}}. \quad (9)$$

El objetivo de control de la teleoperación bilateral con retraso es limitar, para el estado estacionario, el error de coordinación y las velocidades de los robots líder y seguidor, tanto para los conjuntos primarios como secundarios, esto es $\mathbf{e}_p = \mathbf{ref}_p - \mathbf{x}_{\text{sp}}$, $\mathbf{e}_s = \mathbf{ref}_s - \mathbf{x}_{\text{ss}}$, $\dot{\mathbf{x}}_{\text{mp}}$, $\dot{\mathbf{x}}_{\text{ms}}$, $\dot{\mathbf{x}}_{\text{sp}}$, $\dot{\mathbf{x}}_{\text{ss}} \in \mathcal{L}_\infty$, a pesar de los retrasos variables en el tiempo.

3) *Mapeo de tipo Rate/Posición-no-lineal:* La referencia primaria es un mapeo de tipo rate/posición-no-lineal de la forma

$$\begin{aligned} \mathbf{ref}_p = \varepsilon(t)k_a \int_{t_c}^{t_{c+1}} \tanh(k_b \mathbf{x}_{\text{mp}}) dt + \beta(t)k_{gp}\mathbf{f}_p(\mathbf{x}_{\text{mp}}) \\ + \mathbf{ref}_{p,t_c}, \end{aligned} \quad (10)$$

donde $\varepsilon(t)$ y $\beta(t)$ son funciones continuas y diferenciables cuya salida va de 0 a 1 cada vez que se presiona el botón de modo (velocidad/posición no lineal). Definimos un intervalo mínimo entre transiciones Δ_{rp} tal que $t_{c+1} - t_c \geq \Delta_{rp}$. Su derivada se describe como

$$\dot{\mathbf{ref}}_p \leq \xi \gamma + \varepsilon k_a \tanh(k_b \mathbf{x}_{\text{mp}}) + \beta k_{gp} \nabla_{\mathbf{f}_p} \dot{\mathbf{x}}_{\text{mp}}, \quad (11)$$

donde

$$\gamma = k_a \int_{t_c}^{t_{c+\Delta_{rp}}} \tanh(k_b \mathbf{x}_{\text{mp}}) dt + k_{gp}\mathbf{f}_p(\mathbf{x}_{\text{mp}}).$$

y $\dot{\alpha}, \dot{\beta} \leq \xi$.

Por otro lado, la referencia secundaria $\dot{\mathbf{ref}}_s$ depende de los comandos del líder secundario, del comportamiento de la referencia primaria \mathbf{ref}_p y su posición inicial $\mathbf{ref}_s(t_c)$ al momento de la conmutación entre modos. De esta forma, se tiene que

$$\mathbf{ref}_s = k_{gs}\mathbf{f}_s(\mathbf{x}_{\text{ms}}, \mathbf{ref}_p) + \mathbf{ref}_s(t_c), \quad (12)$$

donde su derivada se define como

$$\dot{\mathbf{ref}}_s = k_{gs}\nabla_{\mathbf{f}_s} \dot{\mathbf{x}}_{\text{ms}} + k_{gs}\nabla_{\mathbf{f}_s} \dot{\mathbf{ref}}_p. \quad (13)$$

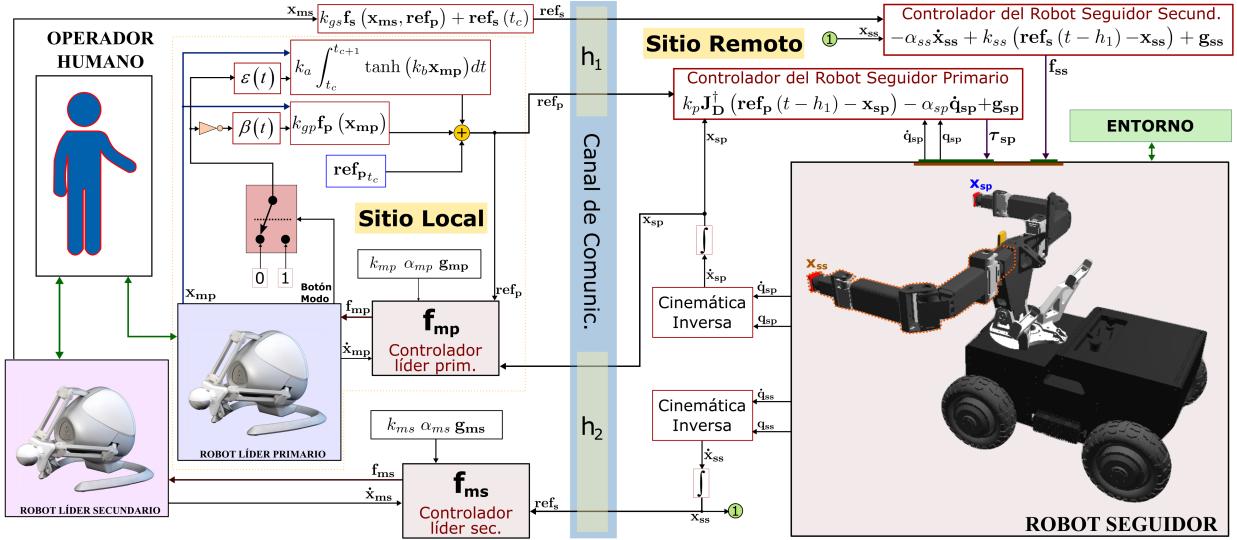


Fig. 1. Esquema de Teleoperación Bilateral para el Manipulador Móvil Dual con Torso

III. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

A. Configuración de los Experimentos y Descripción de la Tarea

1) *Robots*: En el sitio local, ambos dispositivos hápticos utilizados para generar comandos de control son Novint Falcon, los cuales también proporcionan retroalimentación de fuerza en tres ejes cartesianos. El espacio de trabajo para ambos líderes se normaliza a 8 centímetros por eje, y también cuentan con botones utilizados para: en el caso del líder derecho, iniciar los experimentos y cambiar entre los modos de velocidad y posición NL, mientras que el líder izquierdo utiliza un botón para iniciar la generación de referencias secundarias. En el sitio remoto, el sistema robótico es un Manipulador Móvil Dual con Torso (MMDT) simulado en Gazebo-ROS, donde tanto el manipulador derecho como el izquierdo se utilizan para experimentos. La plataforma móvil del MMDT es del tipo de skid-steering [13], mientras que el torso consta de dos grados de libertad, el primero girando alrededor del eje Z y el segundo alrededor del eje Y. Dos manipuladores de 6 grados de libertad están adjuntos en ambos lados. El controlador diseñado considera el efecto final del brazo derecho como el punto primario de interés, mientras que define el extremo operativo del manipulador izquierdo como el punto de interés complementario. El espacio de trabajo del conjunto torso-manipulador con la parte móvil estática es de aproximadamente 60 centímetros, mientras que con el movimiento de la plataforma, el espacio de trabajo está limitado solo en el eje Z en un rango desde el suelo hasta 1.20 metros.

2) *Operadores*: Se consideran cinco operadores con experiencia en teleoperación bilateral para realizar las tareas. Uno de los operadores es mujer, y todos tienen una edad promedio de 33 años, siendo todos diestros.

3) *Descripción de la Tarea*: Como estudio de caso, la tarea a ejecutar se basa en capturar, transportar y colocar

un objeto con ambos extremos operativos. La tarea se puede dividir en tres sub tareas: i) tarea-A: mover todo el conjunto robótico seguidor desde su posición de inicio hacia una zona cercana del objetivo A, ii) tarea-B: capturar el objeto con ambos brazos, iii) tarea-C: transportar el objeto desde el objetivo A hasta el objetivo B (lugar donde se libera el objeto transportado).

Para la tarea-A, se asume que el robot siempre parte desde la misma posición inicial, señalando al operador humano que desplace todo mecanismo robótico hacia el objeto. Este movimiento se logra a través del modo rate del líder primario. Una vez cerca del objetivo-A, ambos extremos operativos del robot MMDT deben posicionarse en un radio cercano al centroide del objeto con velocidad cero, permitiendo la sujeción automática del cuerpo. Esta parte de la prueba se puede ejecutar tanto en modo de rate como en modo de posición, para obtener mayor precisión en el movimiento. Adicionalmente, es necesario señalar que el objeto debe ser levantado ligeramente para sacarlo de su posición de reposo previo al transporte.

Posteriormente, se marca automáticamente el segundo objetivo en el escenario, asumiendo el punto donde se debe liberar el objeto capturado. Para el transporte del objeto, el líder principal requiere usar el modo rate para el desplazamiento de la plataforma móvil, donde movimientos del torso y manipulador primarios pueden provocar la separación del agarre del manipulador secundario. Para corregir esto, el líder secundario es requerido a ejecutar los comandos necesarios para mantener sujeto al objeto por ambos lados. Para completar la sección de transporte, el centroide del objeto debe alcanzar un radio cercano al señalado por el objetivo-B con una velocidad de desplazamiento de los extremos operativos cercana a cero. Finalmente, es requerido por la tarea que el objeto sea liberado alejando ambos extremos operativos del mismo, y retrocediendo el conjunto robótico sin golpearlo.

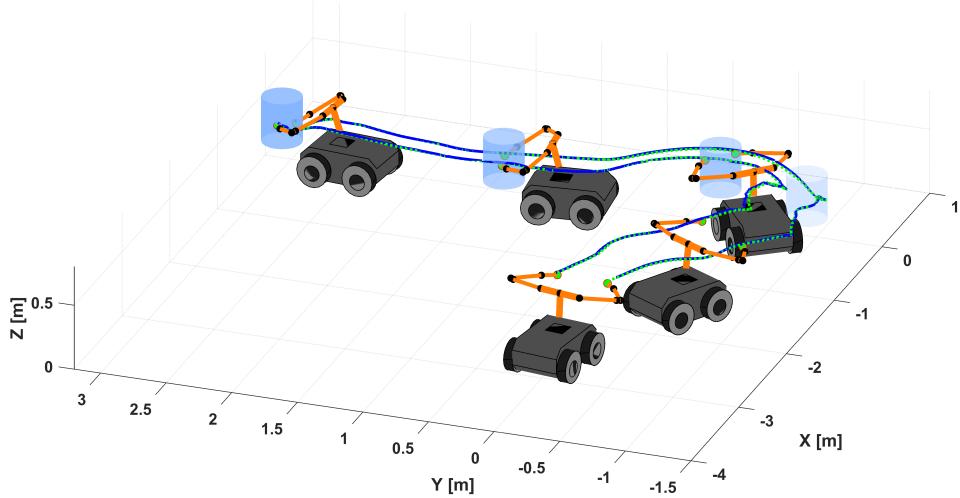


Fig. 2. Reconstrucción de la ejecución de la tarea de captura y transporte del objeto: Vista Lateral

Un botón en el dispositivo háptico primario permite al operador iniciar la prueba, activando un temporizador para determinar posteriormente el tiempo requerido para la ejecución completa de la tarea. El temporizador se detiene al llegar al objetivo B. Una tarea puede determinarse como no exitosa en el caso de que los extremos operativos se separen una distancia considerable en el transporte del objeto (suponiendo la mala sujeción del mismo), deteniendo la ejecución y almacenamiento de información de manera inmediata.

La selección entre los modos de velocidad y posición-no-lineal en ambos robots líderes es libre para cada operador y no está limitada de ninguna manera.

B. Resultados Experimentales

Los resultados experimentales tienen como objetivo demostrar la interacción entre el operador y el sistema de teleoperación bilateral. La reconstrucción de dos de las ejecuciones realizadas permite visualizar el comportamiento general del sistema de teleoperación bilateral, una con y otra sin retardos de tiempo. Las Figuras 2 y 3 muestran una vista lateral y superior del movimiento estroboscópico del robot, indicando la posición inicial, el avance hacia la captura del objeto y su posterior colocación en el punto indicado. La norma de los errores de coordinación y las velocidades tanto para los robots locales como remotos se muestra en las Figuras 4-7, respectivamente, donde los cambios de modo se representan con sombreado verde para los robots primarios y con sombreado celeste para los robots secundarios. Adicionalmente, se señala con color naranja la sección donde el robot está transportando el objeto, desde la captura hasta su liberación. La norma de los errores de coordinación entre los efectores finales de ambos robots se ilustra, para los robots primarios en la Figura 4 y para los robots secundarios en la Fig. 7. Aunque los errores están acotados en todos los casos, se observa un incremento cuando se considera un retraso temporal. Por otra parte, en la

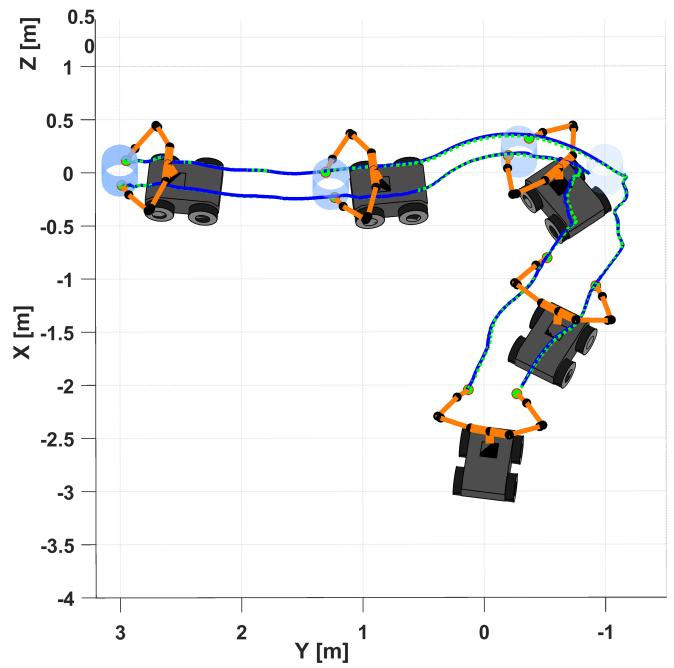


Fig. 3. Reconstrucción de la ejecución de la tarea de captura y transporte del objeto: Vista Superior

Figura 5 se muestra la norma de las velocidades del robot líder primario. Finalmente, la Figura 6 ilustra el comportamiento del robot seguidor primario; indicando que en el modo de posición (utilizado para alcanzar el objeto), las velocidades tienden a cero al alcanzar cada objetivo. El funcionamiento del esquema de teleoperación para controlar el brazo primario se muestra en <https://youtu.be/PjtSxeigUeM>.

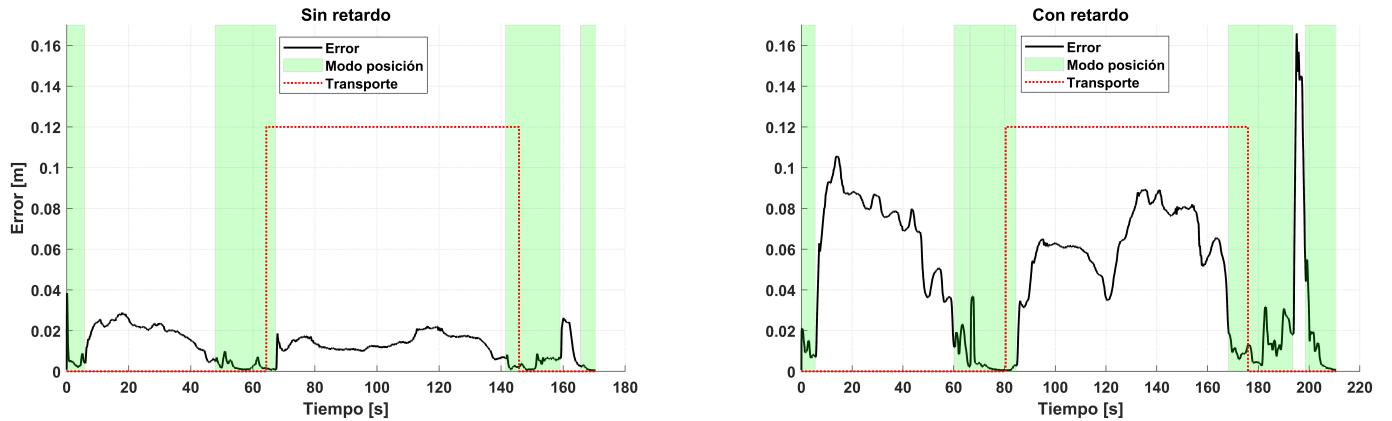


Fig. 4. Error de coordinación entre los robots primarios, sin y con retardo

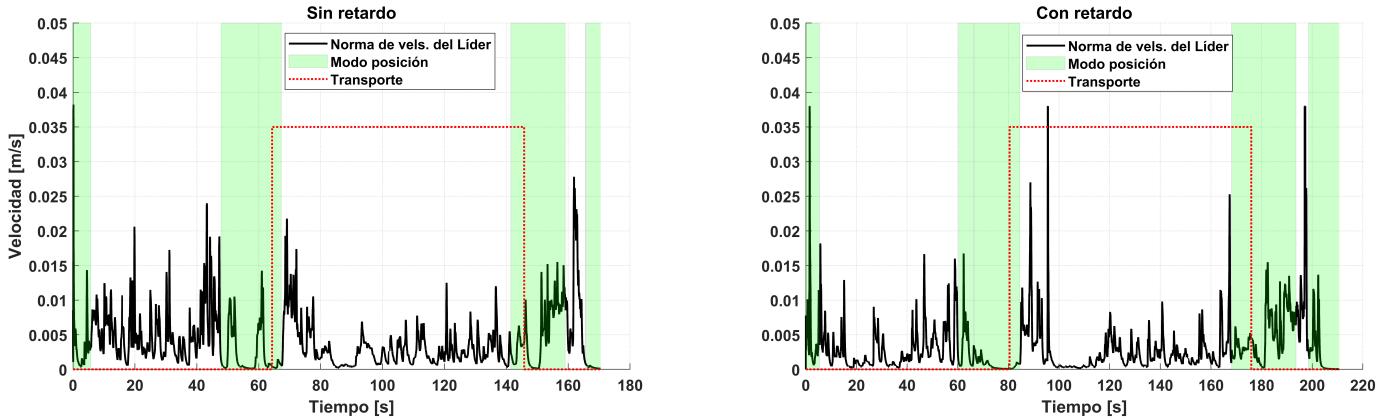


Fig. 5. Norma de las velocidades Cartesianas del E.O. del robot líder primario

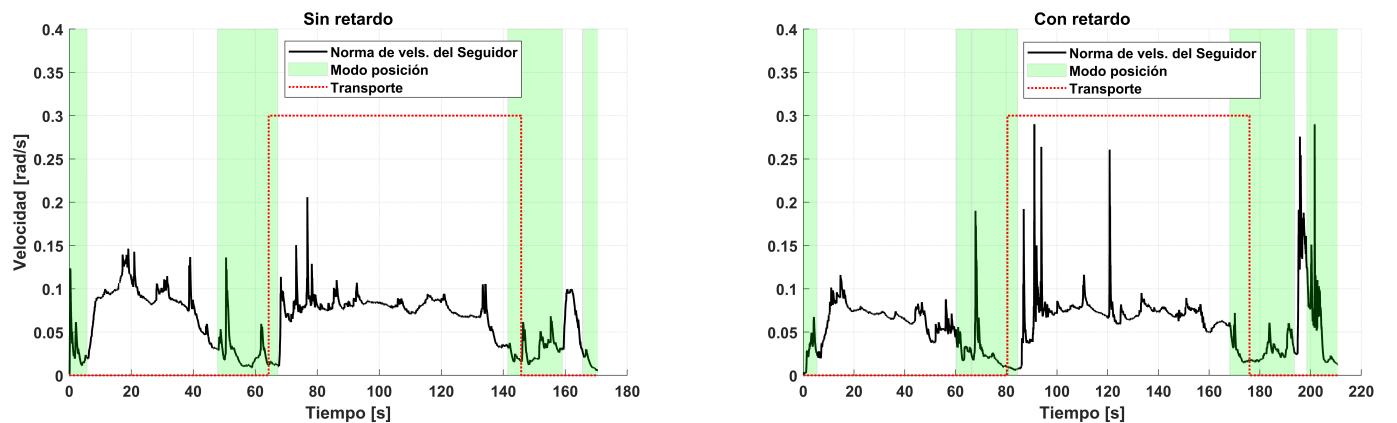


Fig. 6. Norma de las velocidades articulares del robot seguidor primario

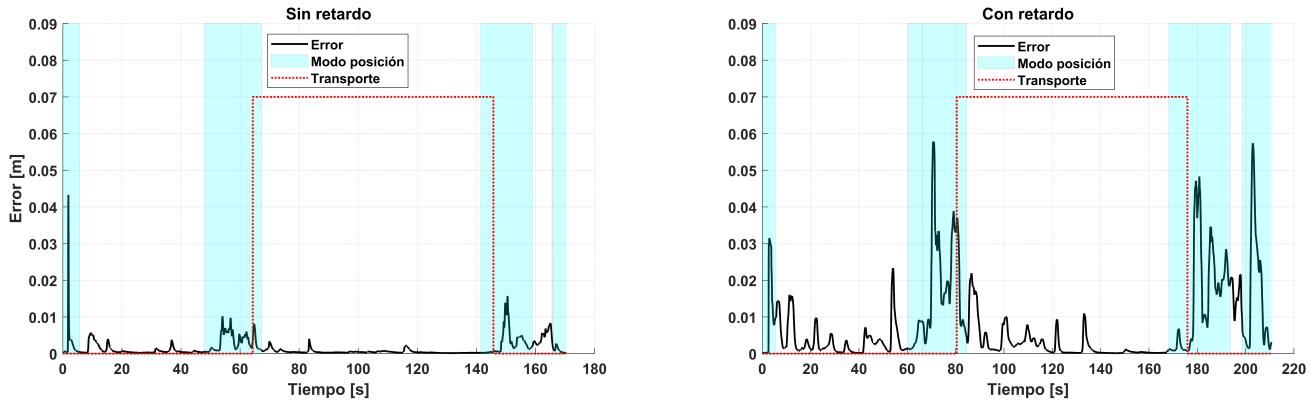


Fig. 7. Error de coordinación entre los robots complementarios, sin y con retraso

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un sistema de teleoperación bilateral para un manipulador móvil dual con torso, considerando retardos temporales e incorporando mapeo de comandos. Al tener un robot remoto redundante integrado por: una plataforma móvil de tipo skid-steering, un manipulador de 6 GDL derecho, un manipulador de 6GD izquierdo, y un torso compartido por ambos brazos, hemos definido secciones del robot denominadas como robot seguidor primario (al conjunto móvil/torso/manipulador-derecho) y robot seguidor secundario (el manipulador izquierdo empotrado en el torso). Entonces, los extremos operativos de cada brazo siguen las referencias generadas por los líderes. Por otra parte, utilizando controladores cartesiano/articular y cartesiano/cartesiano (ambos con una estructura de tipo P+d), hemos formulado un par de funciones continuas que mapean la posición de los robots líderes operando dentro de un espacio de trabajo confinado en comandos de referencia para el robot seguidor completo situado en un espacio de trabajo más extenso.

Este artículo colabora para confirmar, que a medida que la fuerza humana (f_{hi}) es mayor, la transición es más abrupta y la ganancia de velocidad (k_a) es mayor, los errores de coordinación e_p y e_s son mayores. Asimismo, tanto la sección teórica como la experimental determinan la influencia de la referencia primaria sobre el comportamiento del seguidor secundario, dado que el brazo complementario está sujeto a los movimientos tanto del torso como de la plataforma móvil. Finalmente, enfatizamos la utilidad de aplicar el mapeo de velocidad/no lineal-posición junto con controladores cartesiano/articulares para la teleoperación bilateral retrasada de manipuladores móviles para operar estos sistemas redundantes utilizando dispositivos hapticos con pocos grados de libertad, lo cual es beneficioso en la práctica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo cuenta con el apoyo del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). El equipamiento y laboratorios son proporcionados por el Insti-

tuto de Automática, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.

REFERENCES

- [1] F. A. Chicaiza, E. Slawiński, L. R. Salinas, and V. A. Mut, "Evaluation of path planning with force feedback for bilateral teleoperation of unmanned rotocraft systems," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 105, no. 2, p. 34, 2022.
- [2] M. d. C. Claudio, V. Moya, E. Slawinski, and V. Mut, "Simultaneous motion and shape control of redundant mobile manipulators," *International Journal of Engineering Insights*, vol. 1, no. 1, pp. 19–24, 2023.
- [3] C. Smith, Y. Karayannidis, L. Nalpantidis, X. Gratal, P. Qi, D. V. Dimarogonas, and D. Kragic, "Dual arm manipulation-a survey," *Robotics and Autonomous systems*, vol. 60, no. 10, pp. 1340–1353, 2012.
- [4] M. Abbas, J. Narayan, and S. K. Dwivedy, "A systematic review on cooperative dual-arm manipulators: Modeling, planning, control, and vision strategies," *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, vol. 7, no. 4, pp. 683–707, 2023.
- [5] H. Huang, J. Gan, C. Zeng, and C. Yang, "Motion regulation for single-leader-dual-follower teleoperation in flipping manipulation," in *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. Springer, 2022, pp. 483–495.
- [6] P. Kremer, J. L. Sanchez-Lopez, and H. Voos, "A hybrid modelling approach for aerial manipulators," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 105, no. 4, p. 74, 2022.
- [7] D. Sun, A. Kiselev, Q. Liao, T. Stoyanov, and A. Loutfi, "A new mixed-reality-based teleoperation system for telepresence and maneuverability enhancement," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 50, no. 1, pp. 55–67, 2020.
- [8] T. Hernandez, E. Nuno, and A. Y. Alanis, "Teleoperation of mobile manipulators with non-holonomic restrictions," in *2016 IEEE 13th International Conference on Networking, Sensing, and Control (ICNSC)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [9] C. N. Mokogwu and K. Hashtrudi-Zaad, "A hybrid position–rate teleoperation system," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 141, p. 103781, 2021.
- [10] P. Gierlak and M. Szuster, "Adaptive position/force control for robot manipulator in contact with a flexible environment," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 95, pp. 80–101, 2017.
- [11] C. C. Cheah and Y. Zhao, "Inverse jacobian regulator for robot manipulator: theory and experiment," in *2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)(IEEE Cat. No. 04CH37601)*, vol. 2. IEEE, 2004, pp. 1252–1257.
- [12] E. Nuño, L. Basañez, and R. Ortega, "Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial," *Automatica*, vol. 47, no. 3, pp. 485–495, 2011.
- [13] J. Moreno, E. Slawiński, F. A. Chicaiza, F. G. Rossomando, V. Mut, and M. A. Morán, "Design and analysis of an input–output linearization-based trajectory tracking controller for skid-steering mobile robots," *Machines*, vol. 11, no. 11, p. 988, 2023.