

Sistema de teleoperación propioceptiva para la interacción con objetos virtuales

Francesco García Luna, Alma Rodríguez Ramírez,
Osslan Vergara Villegas, Elva Reynoso Jardón,
Manuel Nandayapa

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,
México

{francesco.garcia, alma.rodriguez.ram,
overgara, elva.reynoso, mnandaya}@uacj.mx

Resumen. En el presente trabajo se muestra el desarrollo de un sistema de teleoperación propioceptiva para la interacción con objetos virtuales. Aquí se consideran las relaciones cinemáticas y cinestésicas del teleoperador en el diseño del robot esclavo. El sistema consiste en un sistema de realidad aumentada, 2 marcadores 3D, 2 cámaras infrarrojas, un robot y una computadora para procesar la información. El robot consta de una cámara estéreo montada sobre un sistema de 2 GdL y un robot manipulador de 6 GdL sin pinza. El sistema funciona en 3 etapas: adquisición de señales del teleoperador, control de seguimiento de trayectoria del efector final y estimación de fuerzas sin sensor al contacto. El sistema se comparó contra teclado/mouse, y joystick, en una tarea de teleoperación que consiste en el acercamiento, contacto y alejamiento de dos zonas de contacto, en el menor tiempo posible y con la menor fuerza de contacto.

Palabras clave: Realidad aumentada, propiocepción, teleoperación, control, telecomunicación.

Proprioceptive Teleoperation System for Interaction with Virtual Objects

Abstract. The present work shows the development of a proprioceptive teleoperation system for interaction with virtual objects. In which the teleoperator's kinematics and kinesthetic relations are considered in the design of the slave robot. The system consists of an augmented reality system, 2 3D markers, 2 infrared cameras, a robot and a computer to process the information. The robot consists of a stereo camera mounted on a 2 GdL system and a 6 GdL manipulator robot without a gripper. The system works in 3 stages: Acquisition of teleoperator's signals, end-effector trajectory planning, and sensorless contact force estimation. The system was compared against keyboard / mouse and joystick, in a teleoperation task that consists of approaching, contacting and moving away from two contact zones, in the shortest possible time and with the least contact force.

Keywords: Augmented reality, proprioception, teleoperation, control, telecommunication.

1. Introducción

Un sistema tradicional de teleoperación consiste en al menos un sistema maestro, un sistema esclavo y una interfaz entre ellos. Generalmente, una interfaz de teleoperación consta de uno o varios monitores con teclado/mouse (o joystick) o una combinación entre ellos [6], [3], algunas hacen uso de interfaces de realidad aumentada (RA) o virtual (RV) para compensar la experiencia del usuario [20]. Este tipo de sistemas le permiten al teleoperador operar de forma remota un robot y realizar una actividad en algún ambiente, en varias ocasiones, dañino para el ser humano.

En la literatura se encuentran numerosas aplicaciones de teleoperación, por ejemplo, para asistir a astronautas en el acoplamiento a la Estación Espacial Internacional [22], teleoperación cooperativa en una cirugía de invasión mínima [15], teleoperación con retroalimentación háptica [9], teleoperación bilateral [7], trilateral [21] o multilateral [12], teleoperación cooperativa para vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) [19], manejo automatizado [8], control en tiempo real de un brazo humanoide utilizando señales mioeléctricas [17], entre otros.

Particularmente, uno de los aspectos más importantes en los sistemas de teleoperación es la correcta identificación del efector final del robot remoto, con respecto a los movimientos del teleoperador y la latencia que existe entre el envío de comandos y su ejecución [10]. Además, los sistemas incluyen limitaciones técnicas en cuanto al campo de visión del sistema de visión y la iluminación utilizados en los sistemas tradicionales. También, el efector final o la región de interés queda ocluida por el mismo robot de forma parcial o completa, aumentando la complejidad de la tarea y generando un impacto negativo en el desempeño del sistema.

En algunas investigaciones se han generado diversas estrategias para compensar la falta de información visual, por ejemplo, en [24] se diseñó un algoritmo para detectar objetos en función de patrones ocluidos, en [4] utilizaron una técnica llamada oclusión ambiental fotométrica para calcular la oclusión ambiental y compensar la falta de iluminación en escenas fijas, por otro lado, [25] utilizó un sistema para detectar la profundidad de una imagen con oclusiones, y [2] reconstruyeron una cara parcialmente ocluida con un sistema neuronal semi-supervisado, y trabajos como el de [23], en donde realizaban un seguimiento de un objeto, a pesar de estar ocluido durante un tiempo en su desplazamiento.

Aún con las soluciones propuestas, no se han logrado estandarizar los modelos para resolver el problema de la oclusión del efector final. Lo anterior es debido a que no se ha tomado en consideración la experiencia del usuario, necesaria en sistemas de teleoperación. Por esta razón, un enfoque no cuantitativo, como la propiocepción, se considerará como una mejora en el desempeño de una tarea de teleoperación. La propiocepción es la capacidad del ser humano que le permite percibir la ubicación de las partes de su cuerpo sin ningún tipo de retroalimentación visual [16].

Se ha utilizado en diferentes aplicaciones, como en el diseño de prótesis [5], de pinzas híbridas [14], el mejoramiento de la percepción háptica [13], para predecir la configuración 3D de un robot suave [18], para compensar la falta de retroalimentación sensorial [11], evasión de obstáculos en robot manipuladores [1], entre otros. Tomando en cuenta lo anterior descrito, en el presente artículo se propone un sistema de teleoperación propioceptiva para la interacción con objetos virtuales, utilizando RA

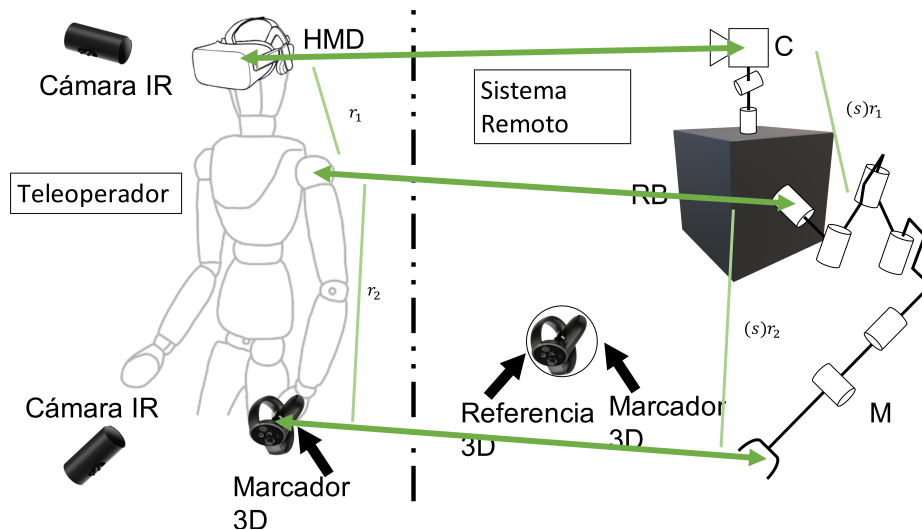


Fig. 1. Esquema del sistema de teleoperación propuesto, en donde se resaltan las relaciones cinemáticas en el diseño del robot remoto utilizando un factor de escala s .

mejorada con propiocepción para asistir a un teleoperador a interactuar con un objeto virtual de forma más eficiente, considerando el tiempo de convergencia y la fuerza de contacto. El sistema toma en consideración las proporciones relativas del ser humano en el diseño del robot remoto y se validó con una serie de experimentos en donde el teleoperador debe realizar la tarea de alcanzar dos puntos de forma precisa y consecutiva, en el menor tiempo posible y con la menor fuerza de impacto posible.

En la sección 2 se muestra el sistema propuesto. En la sección 3 se presentan los diferentes escenarios de teleoperación en donde se identifican los principales métodos de control remoto. Por último, en la sección 4 se presenta un análisis de resultados y en la sección 5 las conclusiones correspondientes.

2. Sistema de teleoperación propioceptiva

El sistema consiste en un sistema de RA, 2 marcadores 3D, 2 cámaras infrarrojas, un robot y una computadora para procesar la información (mostrado en la figura 1). El robot consta de una cámara estéreo montada sobre un sistema de 2 GdL y un robot manipulador de 6 GdL sin pinza. Esta misma cámara es utilizada para complementar, junto con un visor de RV (HMD), el sistema de RA.

Los cámaras infrarrojas se utilizaron, junto con los marcadores 3D que cuentan con una unidad de medición inercial (IMU) de 6 GdL y marcadores infrarrojos para obtener la posición relativa con respecto al HMD. El algoritmo utiliza una versión modificada del motor gráfico Unreal Engine 4.21 que permite la transmisión del video de la cámara estéreo al HMD en el sistema de RA. Además, el motor gráfico permite la comunicación con los Oculus Touch.

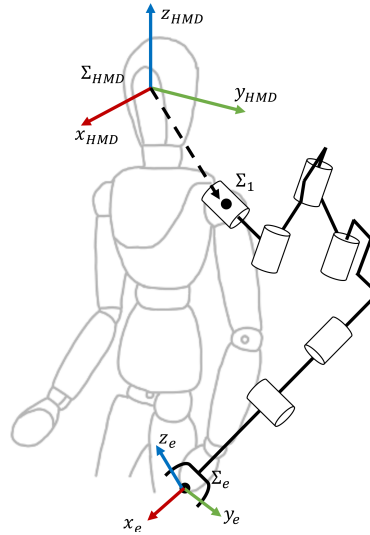


Fig.2. Relaciones cinemáticas entre cabeza-hombro-mano del teleoperador y cámara-base-efector final del robot remoto.

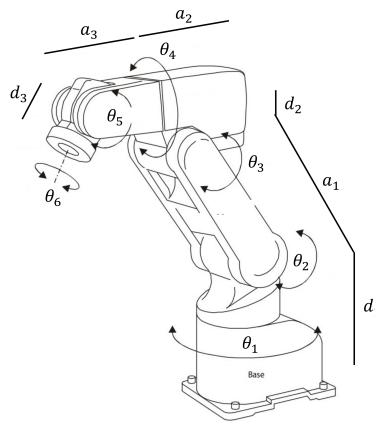


Fig.3. Representación del robot Mitsubishi Melfa RV2A, en donde se describen los parámetros DH.

Sin embargo, el algoritmo de control de seguimiento de trayectoria se ejecuta de forma externa con Python vía socket y web-socket para el envío de las posiciones articulares al robot.

2.1. Modelo cinemático del robot remoto

El robot remoto es diseñado considerando las relaciones cinemáticas del ser humano cabeza-hombro-mano, de forma que el robot cuenta con una relación cámara-base-efector final (mostrado en la figura 2).

Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg del robot propuesto.

Eslabón i	$R_z(\cdot)$	$T_z(\cdot)$	$T_x(\cdot)$	$R_x(\cdot)$
1	θ_1	d_1	0	0
2	0	0	a_1	$-\pi/2$
3	$\theta_2 - \pi/2$	0	a_2	0
4	θ_3	0	a_3	$-\pi/2$
5	θ_4	d_2	0	$\pi/2$
6	θ_5	0	0	$-\pi/2$
7	θ_6	d_3	0	0

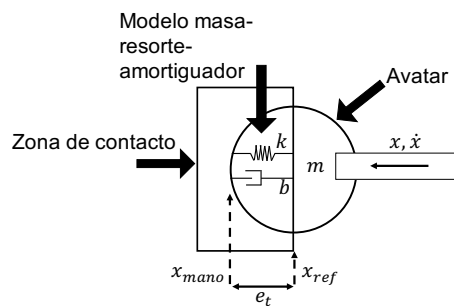


Fig. 4. Representación gráfica de la estimación de la fuerza de contacto utilizando el modelo masa-resorte-amortiguador.

Es importante denotar que, debido a que si bien se mantienen las relaciones cinemáticas cabeza-hombro-mano con cámara-base-efector final, la proporción dimensional cambiará en función de la tarea que se realiza, por ejemplo, una relación 1:1 para un sistema de telepresencia, una relación 1:10 para tareas de construcción o 1:0.01 para cirugías de precisión.

En la figura 3 se observa el manipulador utilizado, donde $\theta_i \in \mathbb{R}$ son las coordenadas generalizadas en radianes, y $d, a \in \mathbb{R}$ son parámetros de Denavit-Hartenberg, los cuales se muestran en la tabla 1.

2.2. Estimación de las fuerzas de contacto sin sensor

Debido a que utilizar un sensor de fuerza implica una complicación en la configuración, montaje, resolución, costo y fragilidad, las fuerzas de contacto se estiman a partir de la penetración del avatar en la región de interés utilizando un modelo masa-resorte-amortiguador (ver Fig. 4), de modo que:

$$f_x = \begin{cases} ke_x + b\dot{e}_x & \text{si } e_x < 0, \\ 0 & \text{de otra forma,} \end{cases} \quad (1)$$

donde $f_x \in \mathbb{R}$ es la fuerza de contacto estimada a partir de un modelo masa-resorte-amortiguador en el eje x , $k \in \mathbb{R}$ es la constante elástica, $b \in \mathbb{R}$ es la constante de amortiguamiento, y $e_x, \dot{e}_x \in \mathbb{R}$ son el componente x del error de posición y velocidad entre la punta del avatar y la región de contacto respectivamente.

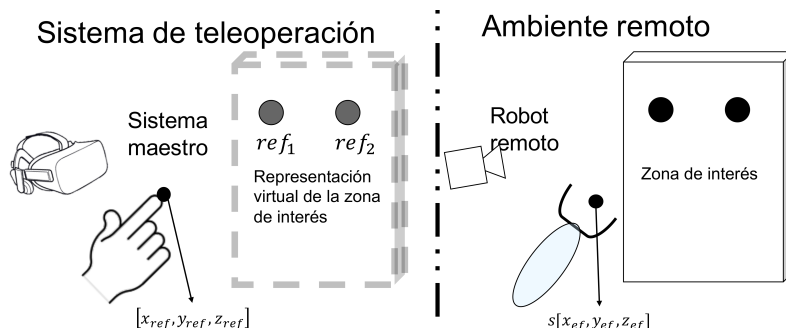


Fig. 5. Escenario experimental propuesto.

Tabla 2. Mapeo de movimientos articulares del avatar utilizando teclado/mouse.

Articulación	Evento
Desplazamiento en x_0	Movimiento vertical del mouse
Desplazamiento en y_0	Movimiento horizontal del mouse
Desplazamiento en z_0	Desplazamiento de la llanta del mouse
Rotación sobre $x_0(\phi)$	Movimiento vertical del mouse + SHIFT
Rotación sobre $y_0(\theta)$	Movimiento horizontal del mouse + SHIFT
Rotación sobre $z_0(\psi)$	Desplazamiento de la llanta del mouse + SHIFT

2.3. Control

Las cámaras infrarrojas utilizan fusión sensorial para identificar la posición de los marcadores 3D tomando en cuenta la información de la IMU y estereografía para obtener de forma precisa la posición y orientación de cada uno de los marcadores con respecto al HMD.

Siendo $\vec{x}_{mano} \in \mathbb{R}^6$ el vector que representa la distancia euclidiana y la orientación entre el HMD y la mano del teleoperador, $\vec{x}_{ref} \in \mathbb{R}^6$ es el vector que representa la posición y orientación del objetivo con respecto al marco coordenado inercial, y $\vec{x}_{HMD} \in \mathbb{R}^6$ es el vector que representa la posición y orientación del HMD con respecto al marco coordenado inercial Σ_0 .

Debido a que el brazo del teleoperador y del manipulador pueden tener diferentes proporciones, se consideró un factor de escala $s \in \mathbb{R}$ en el esquema de control, de modo que:

$$\vec{u}_t = K_p \vec{e}_t + K_i \int \vec{e}_t dt + K_d \dot{\vec{e}}_t, \quad (2)$$

$$\vec{e}_t = \hat{\vec{x}}_{mano} - \vec{x}_{ref} = (s) \vec{x}_{mano} - \vec{x}_{ref}, \quad (3)$$

donde $K_p, K_i, K_d \in \mathbb{R}$ son las ganancias proporcional, integral y derivativa correspondientemente.

Tabla 3. Mapeo de movimientos articulares del avatar utilizando joystick.

Articulación	Evento
Desplazamiento en x_0	Movimiento vertical de la palanca
Desplazamiento en y_0	Movimiento horizontal de la palanca
Desplazamiento positivo en z_0	Presión del gatillo del dedo índice
Desplazamiento negativo en z_0	Presión del gatillo del dedo medio
Rotación sobre $x_0(\phi)$	Movimiento vertical de la palanca + botón A
Rotación sobre $y_0(\theta)$	Movimiento horizontal de la palanca + botón A
Rotación positiva sobre $z_0(\psi)$	Presión del gatillo del dedo índice + botón A
Rotación negativa sobre $z_0(\psi)$	Presión del gatillo del dedo medio + botón A

Tabla 4. Mapeo de movimientos articulares del avatar utilizando joystick.

Articulación	Evento
Desplazamiento en x_0	Desplazamiento en x_0 de la mano
Desplazamiento en y_0	Desplazamiento en y_0 de la mano
Desplazamiento en z_0	Desplazamiento en z_0 de la mano
Rotación sobre $x_0(\phi)$	Rotación sobre $x_0(\phi)$ de la mano
Rotación sobre $y_0(\theta)$	Rotación sobre $y_0(\theta)$ de la mano
Rotación sobre $z_0(\psi)$	Rotación sobre $z_0(\psi)$ de la mano

3. Diseño experimental

La tarea de teleoperación consiste en que el usuario debe de alcanzar dos regiones de interés (descrito en la figura 5) en el menor tiempo posible y con la menor fuerza de contacto, utilizando dos de las interfaces de control más utilizadas en sistemas de teleoperación (teclado/mouse y joystick) y se comparó con el sistema propuesto.

3.1. Método 1: teclado/mouse

El primer método consiste en controlar los 6 grados de libertad del avatar/efector-final utilizando únicamente el teclado y el mouse. De forma que es necesario realizar un mapeo de cada uno de los movimientos articulares del avatar a un evento de los dispositivos de entrada, como se observa en la Tabla 2.

3.2. Método 2: Joystick

En el segundo método, se utiliza como joystick únicamente un Oculus Touch sin usar los sensores inerciales o infrarrojos, es decir, únicamente botones y palancas. Para esto, se mapean los eventos del joystick a movimientos articulares del avatar, como se muestra en la Tabla 3.

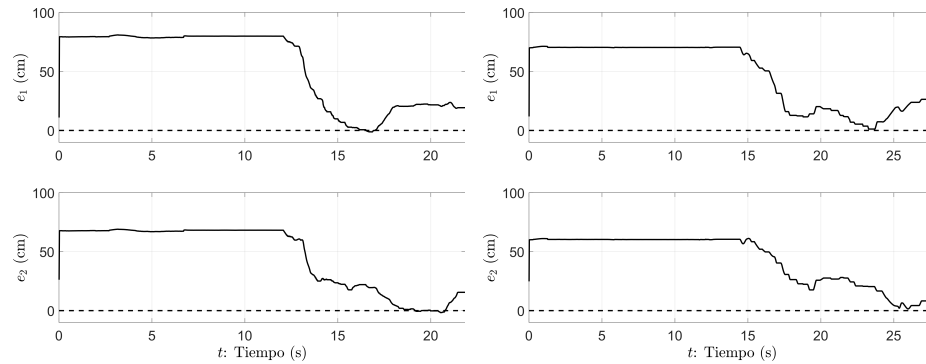


Fig. 6. Error de posición entre el avatar y la referencia 1 (arriba) y la referencia 2 (abajo) utilizando teclado/mouse (6a) y joystick (6b).

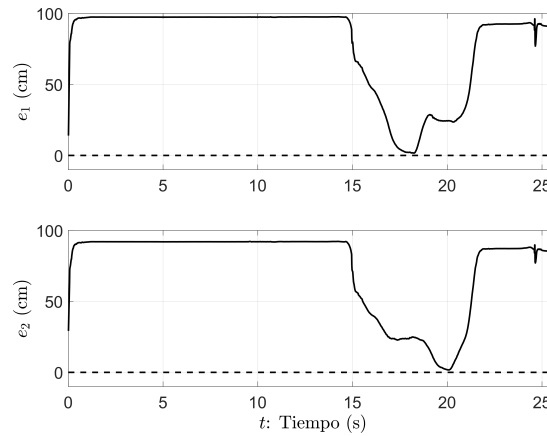


Fig. 7. Error de posición entre el avatar y la referencia 1 (arriba) y la referencia 2 (abajo) utilizando RA + Propiocepción.

3.3. Método 3: RA + propiocepción

Por último, para comprobar el método propuesto, propone un sistema de teleoperación, utilizando RA, propiocepción y considerando las relaciones cinemáticas del ser humano en el control del efector final. De este modo, los movimientos naturales de posición y orientación de la mano con respecto al hombro, son traducidos 1:1 como se muestra en la Tabla 4.

4. Resultados

A continuación se presentan los resultados del desempeño de 3 métodos de teleoperación en la tarea descrita, considerando el error de posición entre la representación de la mano del operador (avatar) y las referencias, las fuerzas de contacto y el error de posición del efector final del robot con las referencias de posición.

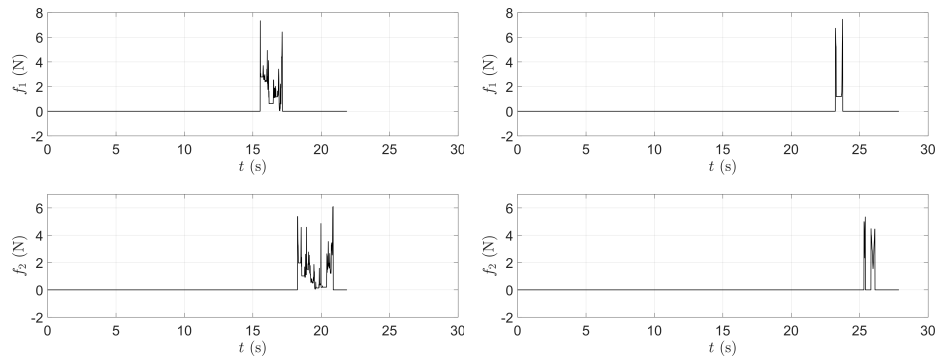


Fig. 8. Fuerzas de contacto estimadas entre el efector final y la referencia 1 (arriba) y la referencia 2 (abajo) utilizando teclado/mouse (8a) y joystick (8b).

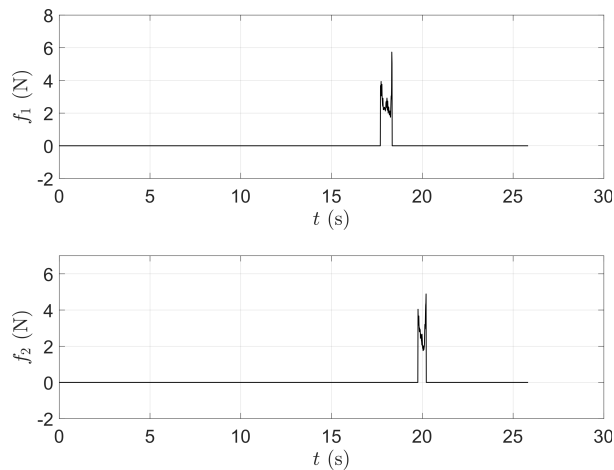


Fig. 9. Fuerza de contacto estimada entre el efector final y la referencia 1 (arriba) y la referencia 2 (abajo) utilizando RA + Propriocepción.

4.1. Tiempo de convergencia

En la Fig. 6a se observa la evolución del error de posición entre el avatar y las referencias en el tiempo utilizando teclado y mouse. El tiempo de convergencia o contacto con la referencia 1 se realizó aproximadamente en 17 segundos, mientras que con la referencia 2, partiendo del contacto con la región 1, sucedió aproximadamente 4 segundos después.

Lo que significa que el tiempo total del experimento de acercamiento y contacto con la referencia 1, distanciamiento o separación de la referencia 1, acercamiento y contacto con la referencia 2 y distanciamiento sucedió en 22 segundos.

Por su parte, utilizando un joystick, el tiempo de contacto con la referencia 1 se realizó después de 23 segundos, realizando un contacto con la referencia 2, 2 segundos después. Esto ocasionó que la duración del experimento completo sucediera en 26 segundos (ver Fig. 6b).

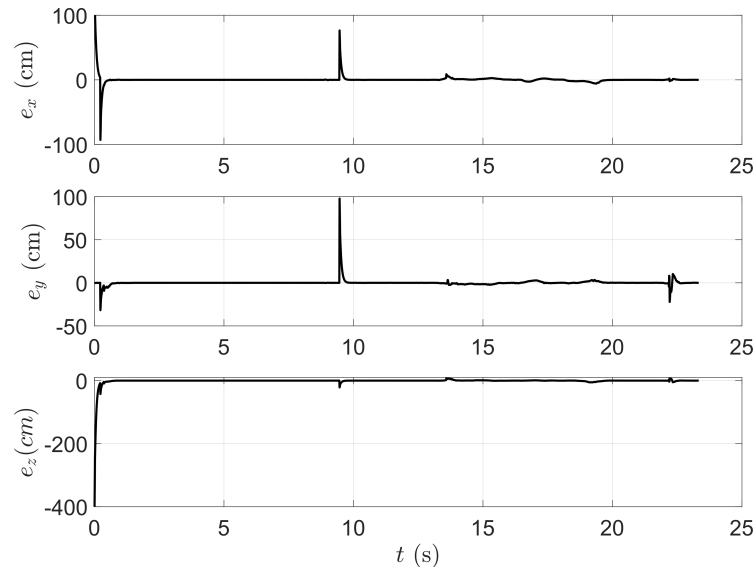


Fig. 10. Error de posición en seguimiento de trayectoria del efector final y la referencia móvil (avatar) utilizando RA + Propiocepción.

De la misma forma, pero utilizando el método propuesto, el tiempo de contacto con la referencia 1 sucedió igual que con el teclado/mouse, a los 17 segundos, con la diferencia de que el contacto con la referencia 2 ocurrió 3 segundos después. El experimento de acercamiento y contacto con la referencia 1, distanciamiento de la referencia 1, acercamiento y contacto con la referencia 2 y distanciamiento fue en 20 segundos (ver Fig. 7).

4.2. Fuerza de contacto

La fuerza de contacto fue modelada como un sistema masa-resorte-amortiguador. Los coeficientes dependen del material con el que se este en contacto. Para fines de simulación se establecieron de forma arbitraria como $k = 1$ y $b = 0,01$.

Utilizando teclado/mouse, la fuerza de contacto máxima que el efector final ejerció sobre la referencia 1 es de $7,3364N$, mientras que con la referencia 2 es de $6,1033N$ (ver Fig. 8a). A diferencia del uso del Joystick, las cuales son de $7,4573N$ y $5,3380N$ respectivamente (ver Fig. 8b). Por su parte, utilizando RA + Propiocepción, la fuerza de contacto con la referencia 1 alcanza un máximo de $5,7318N$ y con la referencia 2 de $4,8866N$ (ver Fig. 9).

4.3. Teleoperación

Como robot esclavo se utiliza un Mitsubishi Melfa RV2A, de 6 grados de libertad, y un control de seguimiento de trayectoria de posición y orientación para ocasionar que el efector final siga la referencia dinámica del avatar y alcance dos puntos en su espacio de trabajo.

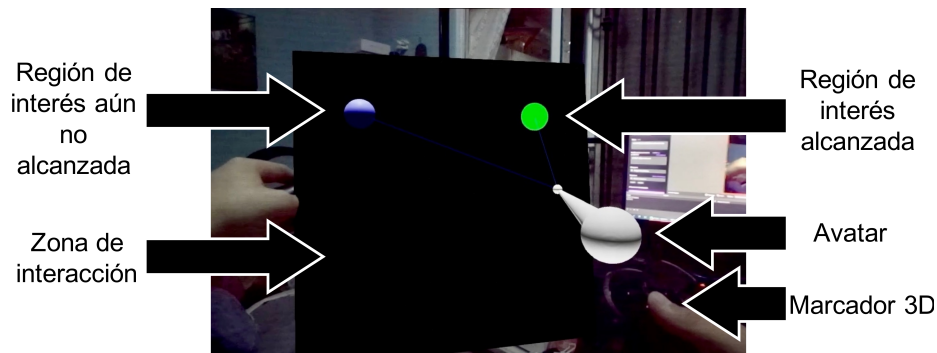


Fig. 11. Interfaz de RA y sus componentes.

Tabla 5. Tabla de desempeño.

Método	t_1 (s)	t_2 (s)	f_1 (N)	f_2 (N)
Teclado/Mouse	17	21	7.3364	6.1033
Joystick	23	25	7.4573	5.3380
RA + Propiocepción	17	20	5.7318	4.8866

En las figuras 10a, 10b y 11 se observa el error de seguimiento entre el efector final y el avatar utilizando teclado/mouse, joystick y la metodología propuesta respectivamente utilizando las ecuaciones (2) y (3). En los tres escenarios, el robot sigue correctamente la trayectoria descrita por el avatar, a pesar de que existe una diferencia en las proporciones cinemáticas entre ambos.

Se considera únicamente la posición del avatar con una orientación constante perpendicular a la zona de interacción. Finalmente, en la Fig. 11 se muestra una imagen de la interfaz de RA en donde se muestran los componentes en interacción.

5. Conclusiones

Considerando que la meta de la tarea era la de realizar contacto con dos áreas en el menor tiempo con la menor fuerza de contacto, existe una clara mejora en el desempeño si se utiliza RA + propiocepción como dispositivo de entrada en un sistema de teleoperación, logrando una mejora del 30 % con respecto al uso de joystick y un 10 % con respecto al teclado/mouse en cuanto al tiempo de convergencia.

Por otro lado, si se consideran las fuerzas de contacto, existe una mejora del 30 % en la referencia 1 y 9 % en la referencia 2 con respecto a utilizar un joystick, y una mejora del 28 % en la referencia 1 y 24 % en la referencia 2 con respecto a utilizar teclado/mouse (ver Tabla 5). Si se compara la Fig. 6a y 7 se observa una disminución en micro-movimientos, lo que significa un menor consumo energético.

Aunque la diferencia entre el uso de teclado/mouse y la metodología propuesta pareciera no ser considerable, es importante destacar que es más fácil controlar posición y orientación del efector final si se utiliza la metodología propuesta, debido a que son los movimientos naturales de la misma mano.

De igual forma, el uso de interfaces de teleoperación que no consideran las relaciones cinemáticas humanas en su diseño, supone un tiempo de adaptación y entrenamiento superior, sin mencionar que el grado de atención es mayor.

Referencias

1. Baradaran-Birjandi, S. A., Kuhn, J., Haddadin, S.: Observer-extended direct method for collision monitoring in robot manipulators using proprioception and IMU sensing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 954–961 (2020) doi: 10.1109/LRA.2020.2967287
2. Cai, J., Han, H., Cui, J., Chen, J., Liu, L., Zhou, S. K.: Semi-supervised natural face de-occlusion. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 16, pp. 1044–1057 (2021) doi: 10.1109/TIFS.2020.3023793
3. Cizmeci, B., Xu, X., Chaudhari, R., Bachhuber, C., Alt, N., Steinbach, E.: A multiplexing scheme for multimodal teleoperation. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, vol. 13, no. 2, pp. 1–28 (2017) doi: 10.1145/3063594
4. Hauagge, D., Wehrwein, S., Bala, K., Snavely, N.: Photometric ambient occlusion for intrinsic image decomposition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 38, no. 4, pp. 639–651 (2016) doi: 10.1109/TPAMI.2015.2453959
5. Koukoulas, N., Bertos, G. A., Mablekos-Alexiou, A., Papadopoulos, E.: A biomechatronic EPP upper-limb prosthesis teleoperation system implementation using bluetooth low energy. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 2, no. 2, pp. 282–291 (2020) doi: 10.1109/EMBC.2018.8512634
6. Li, C., Jiang, Z., Li, Z., Fan, C., Liu, H.: A novel semi-autonomous teleoperation method for the tiangong-2 manipulator system. *IEEE Access*, vol. 7 (2019) doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952762
7. Martínez, C. A. L., Polat, I., Molengraft, R. V. D., Steinbuch, M.: Robust high performance bilateral teleoperation under bounded time-varying dynamics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 206–218 (2015) doi: 10.1109/TCST.2014.2321522
8. Neumeier, S., Wintersberger, P., Frison, A. K., Becher, A., Facchi, C., Riener, A.: Teleoperation: The holy grail to solve problems of automated driving? sure, but latency matters. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pp. 186–197 (2019) doi: 10.1145/3342197.3344534
9. Quan-Zen, A., Horan, B., Nahavandi, S.: Multipoint haptic mediator interface for robotic teleoperation. *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 86–97 (2015) doi: 10.1109/JSYST.2013.2283955
10. Rakita, D., Mutlu, B., Gleicher, M.: Effects of onset latency and robot speed delays on mimicry-control teleoperation. In: *Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 519–527 (2020) doi: 10.1145/3319502.3374838
11. Rossi, M., Bianchi, M., Battaglia, E., Catalano, M. G., Bicchi, A.: HapPro: A wearable haptic device for proprioceptive feedback. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 138–149 (2019) doi: 10.1109/TBME.2018.2836672
12. Shahbazi, M., Atashzar, S. F., Patel, R. V.: A systematic review of multilateral teleoperation systems. *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 3, pp. 338–356 (2018) doi: 10.1109/TOH.2018.2818134
13. Sornkarn, N., Nanayakkara, T.: Can a soft robotic probe use stiffness control like a human finger to improve efficacy of haptic perception? *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 2, pp. 183–195 (2017) doi: 10.1109/TOH.2016.2615924

14. Su, Y., Fang, Z., Zhu, W., Sun, X., Zhu, Y., Wang, H., Tang, K., Huang, H., Liu, S., Wang, Z.: A high-payload proprioceptive hybrid robotic gripper with soft origamic actuators. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 3003–3010 (2020) doi: 10.1109/LRA.2020.2974438
15. Takhmar, A., Polushin, I. G., Talasaz, A., Patel, R. V.: Cooperative teleoperation with projection-based force reflection for MIS. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 4, pp. 1411–1426 (2015) doi: 10.1109/TCST.2014.2369344
16. Taylor, J.: Proprioception. In: Squire, L. R. (ed) *Encyclopedia of Neuroscience*, pp. 1143–1149 (2009)
17. Tortora, S., Moro, M., Menegatti, E.: Dual-myoelectric real-time control of a humanoid arm for teleoperation. In: *Proceedings of the 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 624–625 (2019) doi: 10.1109/hri.2019.8673259
18. Truby, R. L., Santina, C. D., Rus, D.: Distributed proprioception of 3d configuration in soft, sensorized robots via deep learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 3299–3306 (2020) doi: 10.1109/LRA.2020.2976320
19. Vitor, R., Keller, B., D’Angelo, T., Azpurua, H., Bianchi, A. G. C., Delabrida, S.: Collaborative teleoperation evaluation for drones. In: *Proceedings of the 18th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery* (2019) doi: 10.1145/3357155.3358439
20. Walker, M. E., Hedayati, H., Szafir, D.: Robot teleoperation with augmented reality virtual surrogates. In: *Proceedings of the 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)* (2019) doi: 10.1109/hri.2019.8673306
21. Weihua, L., Haibo, G., Liang, D., Mahdi, T.: Trilateral predictor-mediated teleoperation of a wheeled mobile robot with slippage. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 738–745 (2016) doi: 10.1109/LRA.2016.2522503
22. Wilde, M., Chua, Z. K., Fleischner, A.: Effects of multivantage point systems on the teleoperation of spacecraft docking. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 44, no. 2, pp. 200–210 (2014) doi: 10.1109/THMS.2013.2295298
23. Yang, Y., Sundaramoorthi, G.: Shape tracking with occlusions via coarse-to-fine region-based sobolev descent. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 37, no. 5, pp. 1053–1066 (2015) doi: 10.1109/TPAMI.2014.2360380
24. Zhou, C., Yuan, J.: Occlusion pattern discovery for object detection and occlusion reasoning. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 30, no. 7, pp. 2067–2080 (2020) doi: 10.1109/TCSVT.2019.2909982
25. Zhu, H., Wang, Q., Yu, J.: Occlusion-model guided antiocclusion depth estimation in light field. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 11, no. 7, pp. 965–978 (2017) doi: 10.1109/JSTSP.2017.2730818