

Jornadas de Automática

Rehabilitación Médica mediante Robótica y Realidad Virtual: Proyecto VirtualR3

Garrido, J.^{a,*}, Riveiro, E.^a, Silva-Muñiz, D.^a, do Olmo-Otero, D.^a

^aGrupo en Ingeniería Eficiente y Digital (EN.EDI), Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Vigo, C/Maxwell, n° 9, 36310, Vigo, España

To cite this article: Garrido, J., Riveiro, E., Silva-Muñiz, D., do Olmo-Otero, D. 2024. Medical Rehabilitation using Robotics (CDPR) and Virtual Reality: VirtualR3 Project. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10812>

Resumen

El artículo presenta la investigación que se está realizando en el marco del proyecto europeo VirtualR3 "Virtual Reality in Robotic movements assistance for Rehabilitation". El objetivo es el desarrollo de un prototipo para realizar ejercicios de rehabilitación de miembros inferiores para pacientes con distintos grados de necesidades terapéuticas mediante robótica paralela actuada por cables (CDPR, *Cable-Driven Parallel Robots*) junto con Realidad Virtual (RV). El artículo presenta este el marco de investigación del proyecto y se centra en la integración entre el control de movimiento del CDPR y el seguimiento de los movimientos por parte del dispositivo de Realidad Virtual que llevará el paciente (gafas). Se analizan las prestaciones de la integración entre el CDPR como maestro del movimiento y la RV en seguimiento, y el alternativo del dispositivo de RV como maestro y CDPR en seguimiento, que serán empleadas en los distintos modos de funcionamiento del sistema.

Palabras clave: Ingeniería de Rehabilitación y Asistencia Sanitaria, Instrumentos Virtuales, Sistemas de Control de Movimiento, Sistemas Mecatrónicos, Tecnología Robótica.

Medical Rehabilitation using Robotics and Virtual Reality: VirtualR3 Project.

Abstract

The article presents the research being carried out in the framework of the European project VirtualR3 "Virtual Reality in Robotic movements assistance for Rehabilitation". The objective is the development of a prototype to perform lower limb rehabilitation exercises for patients with varying degrees of therapeutic needs using cable-driven parallel robotics (CDPR) in conjunction with Virtual Reality (VR). This article presents the research framework of the project and focuses on the integration between the movement control of the CDPR and the tracking of the movements by the Virtual Reality device worn by the patient (glasses). The performance of the integration between the CDPR as motion master and the VR tracking, and the alternative of the VR device as master and CDPR tracking, which will be employed in the different modes of operation of the system, are analysed.

Keywords: Mechatronic Systems, Motion Control Systems, Rehabilitation Engineering and Healthcare Delivery, Robotic Technology, Virtual Instruments.

1. Introducción

La rehabilitación tiene por objeto ayudar a los pacientes a mejorar su estado tras una lesión a través de la realización de sesiones de entrenamiento repetitivas. Se emplean una amplia variedad de dispositivos: estructuras mecánicas fijas, mecanismos, maquinaria activa e incluso dispositivos

robóticos. En el caso concreto de la rehabilitación de los miembros inferiores, estos dispositivos van desde barandillas para que los pacientes se apoyen mientras intentan caminar, grúas con ruedas que soportan la mayor parte del peso del paciente para que pueda intentar mover las piernas con poca carga de apoyo, máquinas como bicicletas, cintas de correr,

etc., e incluso exoesqueletos pasivos y activos (robóticos) (Díaz et al., 2011).

Unas soluciones son poco flexibles a la hora de definir los ejercicios (como las barandillas, carriles fijos al techo); otras como las grúas móviles dependen de la intervención física del paciente o del terapeuta para seguir la trayectoria. Otras soluciones como los exoesqueletos pueden llegar a ser demasiado complejas para ejercicios en los que simplemente hay que soportar parte del peso del paciente y seguirlo en sus movimientos autónomos. El proyecto VirtualR3 propone el uso de robótica CDPR (*Cable-Driven Parallel Robots*) para esta situación, con la intención de acompañar estos movimientos o forzarlos ligeramente, permitiendo sistematizar recorridos o movimientos más libres en 3D, en espacios amplios y con una parametrización y control continuo de la carga y esfuerzo exigido al paciente.

Por otro lado, todos estos entornos de rehabilitación se apoyan cada vez más en entornos de Realidad Virtual (RV) con pantallas o gafas, para acompañar los movimientos del paciente y hacerlo más motivante (Luque-Moreno et al., 2015). Esta tecnología ya es considerada de uso común en diversos entornos distintos del médico, como los puramente recreativos o de entrenamiento (Putranto et al., 2023).

La interacción persona-entorno de RV se consigue a través de distintas estrategias y sensores (Li et al., 2019). Desde los "mandos de mano" hápticos, a sensores de movimiento sobre la persona o sobre el dispositivo de rehabilitación en la que se producen estos movimientos, como en el caso de la RV en bicicletas y cintas de correr (Deutsch et al., 2013), (Hamzeheinejad et al., 2021).

El artículo presenta la estrategia que se está desarrollando en el marco del proyecto europeo VirtualR3, que propone una combinación de robótica CDPR para acompañar los movimientos, y RV y Realidad Mixta (RM) para crear escenas motivadoras de entornos que sigan estos movimientos. El paciente experimentará el movimiento en diferentes escenas de forma inmersiva a través de un dispositivo de visión (gafas).

El seguimiento del entorno virtual de los movimientos es un factor importante para conseguir una inmersión realista. El artículo se centra en este punto y analiza la integración de un Subsistema de Control de trayectorias de un CDPR y un Procesador de escenas del subsistema de RV encargado de convertir el movimiento y se analiza la capacidad del robot de seguir movimientos detectados por la cámara de RV.

2. Robótica paralela actuada por cables (CDPR)

2.1. Fundamentos de los CDPR

Los robots paralelos accionados por cable (CDPR) son un tipo de robots paralelos que utilizan varios cables para accionar y controlar el movimiento del efector final del robot (es decir, la herramienta o pinza acoplada al punto final del robot). Las configuraciones de robots paralelos se estudian desde hace décadas. Un ejemplo bien conocido son los robots Delta, introducidos por Clavel en 1985 para realizar operaciones rápidas de manipulación de alimentos o ensamblaje de circuitos electrónicos, entre otros (Clavel, 1989). Todos estos robots paralelos implican eslabones sometidos a cargas de tracción y compresión. A mediados de

los ochenta, Landsberger y Sheridan propusieron una evolución de la plataforma Stewart pero totalmente accionada por cables (CDPR) (Landsberger, 1984). Debido a los cables, los CDPR no funcionan con cargas compresibles, sino sólo con cargas de tracción.

Los CDPR suelen tener una base o bastidor fijo que soporta varios actuadores, normalmente servomotores, para controlar los cables. El movimiento del efector final viene determinado por la tensión y la longitud de los cables. El número de cables y la colocación de los motores determinan los grados de libertad del robot, su estabilidad y su complejidad (Carricato and Merlet, 2013). Los CDPR cuya posición no es posible modificar sin cambiar la longitud de los cables se denominan totalmente restringidos (Figura 1). En general, esta arquitectura requiere al menos un cable más que grados de libertad. Un CDPR se considera subrestringido cuando es posible cambiar su posición y orientación sin cambiar la longitud de sus cables (Zhang et al., 2022). Aunque los CDPR totalmente restringidos pueden realizar trayectorias de movimiento con más precisión a altas velocidades en comparación con los CDPR subrestringidos, estos últimos tienen la ventaja de reducir la probabilidad de interferencia entre cables y obstáculos porque el efector final está suspendido, por lo que el espacio de trabajo bajo el robot está libre de cables (Barbazza et al., 2017).

Los CDPR presentan algunas ventajas en comparación con otras configuraciones más clásicas. Tienen un alto rendimiento dinámico, un mayor espacio de trabajo, unos costes de fabricación y mantenimiento reducidos, son más fáciles de montar y desmontar, proporcionan una gran modularidad y reconfigurabilidad y una menor inercia y una mayor relación carga útil/peso (Qian et al., 2018). Estas ventajas los hacen adecuados para muchos escenarios de aplicación, desde aplicaciones civiles como cámaras en movimiento en transmisiones de eventos sociales, configuraciones accionadas por cable en barcos, sector manufacturero, logística, construcción, plataformas de simulación de movimiento, hasta aplicaciones médicas (rehabilitación de pacientes) (Zhang et al., 2022).

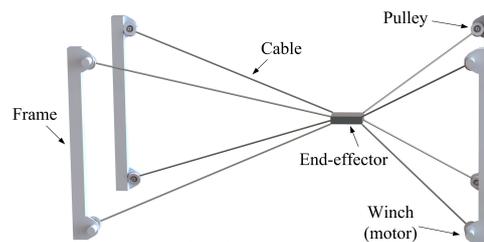


Figura 1: CDPR de ocho cables totalmente restringido.

2.2. CDPR en rehabilitación médica

Las soluciones de dispositivos de ayuda a la rehabilitación basadas en bicicletas y cintas de correr están limitadas por el tipo de maquinaria que soporta al paciente. No permiten una amplia gama de movimientos más allá del pedaleo estático o la marcha/carrera en línea recta, como cambios de dirección, saltos, etc., ni proporcionan al usuario la experiencia de recorrer libremente un espacio con cierta extensión (Belda-Lois et al., 2011). Además, no están pensadas para acompañar a la persona en su movimiento (incluso apoyándola) y liberar a su tren inferior de un porcentaje del esfuerzo necesario para

soportar parte del peso corporal y producir el movimiento, lo que sería un requisito importante para su uso en rehabilitación (Belda-Lois et al., 2011). Estas limitaciones podrían cubrirse con soluciones más complejas, como los exoesqueletos robóticos. Sin embargo, se trata de sistemas extremadamente complejos desde el punto de vista tecnológico, con todo lo que ello conlleva desde el punto de vista práctico. Además, a veces todavía tienen que utilizarse con sistemas auxiliares para mantener la verticalidad (carro) o para la corriente en caso de caída (cable) (Hesse et al., 2000).

Los CDPR pueden ser un sistema alternativo que permita cubrir grandes espacios, así como la posibilidad de realizar movimientos en 3D, mediante un sistema tecnológicamente sencillo (al menos desde una perspectiva mecatrónica). La Figura 1 muestra una configuración de CDPR de ocho cables. Los CDPR presentan algunas ventajas en comparación con otras configuraciones de robots. Entre otras, tienen un mayor espacio de trabajo y una gran reconfigurabilidad y adaptación a las características del entorno, lo que los hace adecuados para muchos escenarios de aplicación, incluidas las aplicaciones médicas (rehabilitación de pacientes).

Uno de los CDPR para rehabilitación más destacados es el STRING-MAN, donde el robot es usado para sostener y ajustar la asistencia necesaria al paciente mientras este camina sobre una cinta de correr (Surdilovic and Bernhardt, 2004). Otro ejemplo es el proyecto "Discover2Walk" (Delgado-Oleas et al., 2023) consiste en exoesqueleto basado en un CDPR para controlar el movimiento de la pelvis durante la marcha para ayudar a caminar a niños con parálisis cerebral, mediante el uso de una configuración subrestringida de cuatro cables, contando además con ocho cables adicionales para controlar el movimiento de cada tobillo. Toda la estructura se desplaza con la persona con ruedas omnidireccionales actuadas. En (Huamanchahua et al., 2021) puede consultarse una revisión sobre el uso de CDPRs en rehabilitación y asistencia. La propuesta del proyecto VirtualR3 aporta flexibilidad a la hora de realizar movimientos libres omnidireccionales, incluso en vertical (para, por ejemplo, la subida o bajada de escaleras), y no restringe el movimiento a recorridos fijos marcados por las características constructivas de otras estructuras que acompañan al paciente.

2.3. Proyecto VirtualR3: CDPR para rehabilitación médica combinado con Realidad Virtual

El proyecto VirtualR3 plantea varios escenarios de aplicación en función del nivel de interacción del paciente con el entorno que le rodea, desde una RV (Figura 2) hasta una RM (Figura 3) y también en función de cómo el paciente genera las órdenes a la interacción con el sistema de RV: el paciente genera las órdenes y el sistema supervisa y reacciona; el sistema genera las órdenes y el paciente supervisa y reacciona; y el sistema genera las órdenes y el paciente es totalmente pasivo. Estos tres tipos de escenarios de interacción paciente-sistema son:

Escenario objetivo 1: El paciente genera las órdenes, y los sistemas supervisan y reaccionan. En este escenario, el paciente genera la intención de movimiento. La RV anima al paciente a tomar su propia decisión de movimiento: avanzar,

detenerse, girar. Pero, finalmente, es el paciente, con sus fuerzas hápticas corporales, quien decide moverse y realizar los movimientos reales. El sistema se limita a acompañarle y a comprobar que los parámetros cinemáticos se encuentran en el rango de trabajo seguro. La supervisión médica puede "forzar" las decisiones de movimiento del paciente modificando en línea los parámetros de Resistencia. Esto está especialmente dirigido a pacientes con un alto grado de autonomía de movimiento, (pero debe ser confirmado y definido completamente por expertos médicos).

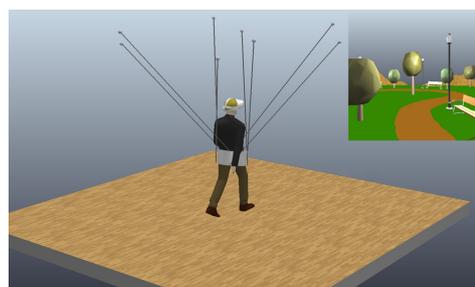


Figura 2: Paciente sostenido por CDPR y escena de Realidad Virtual.

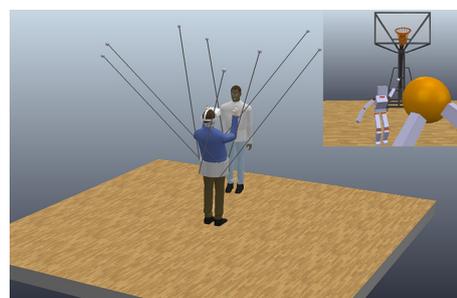


Figura 3: Paciente sostenido por CDPR y escena de Realidad Mixta.

Escenario objetivo 2: el sistema genera las órdenes y el paciente supervisa y reacciona. En este escenario, el sistema genera los movimientos. La escena de RV sigue los movimientos del sistema (y, por tanto, del paciente) (preprogramados), y la escena de RV informa al paciente sobre el movimiento que tendrá que realizar. El sistema supervisa la resistencia del paciente (control háptico corporal) para regular el movimiento real. El supervisor médico puede "forzar" más o menos el esfuerzo del paciente cambiando los parámetros de movimiento en línea. Esto está especialmente dirigido a pacientes que necesitan una asistencia al movimiento muy elevada (pero que debe ser confirmada y definida completamente por expertos médicos).

Escenario objetivo 3: En este modo de operación el robot acompaña al paciente en su desplazamiento libre, y sin que medie necesariamente ningún sistema de soporte, es decir, ningún arnés. El paciente tendrá la confianza de que puede apoyarse en cualquier momento en unas "barandillas" que lo siguen en su movimiento (que serían desplazadas por el CDPR). La RV acompaña igualmente al paciente en su movimiento a través de la dinámica de la escena.

3. Arquitectura de integración CDPR y RV

El primer objetivo es definir, desde un punto de vista médico, los ejercicios terapéuticos y sus parámetros, así como las escenas virtuales correspondientes y adecuadas (SO1, en Figura 4), para que el paciente los realice con éxito y

seguridad. Esto significa definir variables como la velocidad de los movimientos previstos, el peso que deben soportar las piernas del paciente, el radio máximo o mínimo para los movimientos en arco, información auxiliar como datos corporales (pulsaciones, etc.) o sensores conectados a las articulaciones del paciente. La terapia debe contar con un panel de ejercicios para configurar, supervisar y cambiar dinámicamente estos parámetros, así como para seleccionar la escena de RV más adecuada para guiar y motivar a los pacientes (SO2, en Figura 4). Para ello el grupo de Ingeniería Eficiente y Digital de la UVigo, desarrollador del proyecto VirtualR3, cuenta con el asesoramiento del Servicio de Medicina Física y Rehabilitación del Área Sanitaria de Vigo.

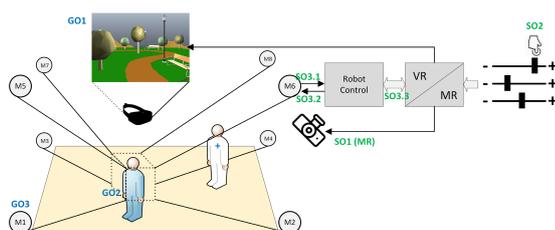


Figura 4: Arquitectura de entorno rehabilitación VirtualR3.



Figura 5: Modelo 3D del entorno de rehabilitación a instalar en el laboratorio de la UVigo: Pilares, sistema de control de cables, jaula móvil para soportar al paciente. Laboratorio con sistema de rehabilitación.

Uno de los objetivos del proyecto es conseguir una experiencia real (SO1, Figura 4) mediante escenas de RV inmersivas y movimientos 3D reales sincronizados, además de un control háptico corporal sensible (SO3, Figura 4). Este control háptico corporal obtendrá las intenciones del paciente a través de las señales de tensión del cable del robot (SO3.1, Figura 4), y en respuesta, el sistema de control evolucionará el mundo físico (SO3.2, Figura 4) y el Mundo Virtual (SO3.3, Figura 4). El objetivo final del proyecto es alcanzar una solución RL8, lo que implicará un sistema funcional que sea rentable (hardware como motores, etc.), y que cumpla con todas las normativas requeridas.

4. Integración CDPR-RV

Uno de los objetivos del proyecto es la construcción de un prototipo físico de ocho cables, y en la actualidad se está en esa fase. La Figura 5 es una representación 3D de la arquitectura mecánica a instalar en el laboratorio del grupo, y la Figura 6 ubica, mediante Realidad Aumentada, este modelo 3D en dicho laboratorio. Paralelamente, la investigación se centra en la integración de los entornos virtuales y mixtos con el control tiempo real CDPR. Para ello,

se emplea un primer prototipo de CDPR de cuatro cables puesto en marcha por el equipo de investigación (Figura 7).



Figura 6: Modelo 3D del entorno de rehabilitación superpuesto en su situación física definitiva en el laboratorio de Logística y Mantenimiento Industrial (Ricardo Marín) de la UVigo.

En este prototipo se ha evaluado la capacidad del CDPR para seguir en tiempo real los movimientos de las gafas. Es decir, seguimiento del robot a la RV (gafas montadas en un robot colaborativo, simulando un movimiento del paciente).

El prototipo de CDPR empleado está controlado por un controlador industrial Beckhoff CX5130 que dispone de capacidades de Control Numérico. Los cuatro servomotores conectados a través de EtherCAT son del mismo fabricante (AM8112-0F11-0000).

Se realizaron unas trayectorias con las gafas montadas en un robot colaborativo UR5 (Figura 7). Las gafas (Meta Quest 3) captan el desplazamiento y este es comunicado al controlador del movimiento del CDPR que intenta seguir el movimiento lo más fielmente posible en su recorrido y tiempo. Este modo de operación responde al "escenario objetivo 3", donde el paciente no está sostenido por el CDPR y se mueve libremente, pero sabiendo que puede apoyarse en cualquier momento en unas "barandillas" instaladas en el CDPR, las cuales siguen su movimiento (detectado por las gafas de RV que lleva el paciente). Esta solución también puede llegar a emplearse en alguna modalidad del escenario 1.

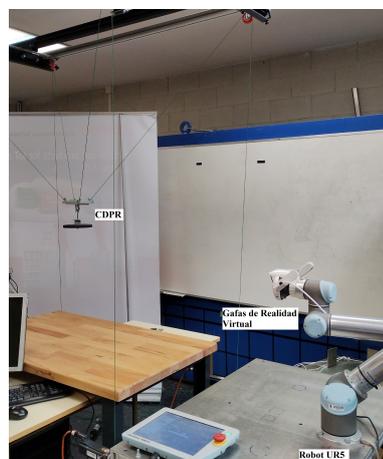


Figura 7: Equipamiento utilizado en el experimento. El robot colaborativo emula movimientos sistemáticos de un paciente. Las gafas de RV (que llevaría el paciente) están acopladas al robot colaborativo. El movimiento de las gafas es transmitido al CDPR para que este los reproduzca.

Más específicamente, se realizó el siguiente experimento. Con el robot UR5, se realizó una trayectoria a 50 mm/s. En las gafas se implementó un filtro de Kalman para reducir el ruido en los valores y tener una señal más continua. El filtro de Kalman se configuró con los valores $Q=0.005$ y $R=2$, escogidos manualmente, y generó un retardo de 80 ms aproximadamente. La Figura 8 muestra los datos de las gafas sin filtrar, tras el filtro de Kalman con el retardo, y esta última eliminando el retardo.

Los datos de las gafas se envían desde el dispositivo de RV al controlador industrial a través del protocolo de comunicación ADS (Automation Device Specification). El tiempo medio entre dos nuevos datos de las gafas al CDPR fue de 25.33 ms, con 6.66 ms de desviación estándar.

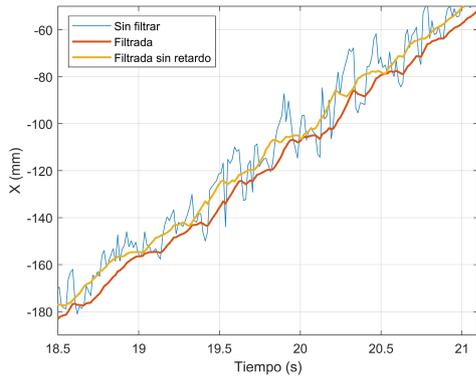


Figura 8: Evolución temporal de las señales obtenidas de las gafas (azul), tras aplicar el filtro de Kalman (naranja) y Kalman sin retardo (amarilla).

Para realizar el movimiento de los cables en el CDPR, cada nueva posición (x, y) de las gafas se envía a dos ejes de *encoder* virtuales (x, y) con la suficiente resolución. Estos ejes de *encoder* se engranan virtualmente con los ejes de movimiento del CDPR, y automáticamente convierte esos valores a los valores de longitud de cada cable mediante la cinemática inversa proporcionada por el fabricante del controlador industrial.

El método empleado para realizar el movimiento de los ejes del CDPR implica una ausencia de control de la velocidad de estos, por lo que la interpolación lineal de los puntos alcanzados por el dispositivo de RV permite la realización de un movimiento continuo en velocidad. La falta de determinismo en las comunicaciones empleando ADS implican un cálculo continuo del número de puntos necesarios para la segmentación lineal. Para garantizar la ausencia de discontinuidades en el movimiento se almacena un *buffer* de los últimos tres puntos alcanzados por el dispositivo de RV. Este sistema de generación de trayectoria implica un retraso de tres ciclos de comunicación entre el movimiento real del dispositivo de RV y el movimiento del CDPR (aproximadamente 86 ms) que se suma al retraso producido por la aplicación del filtro de Kalman.

Empleando este *buffer* de consignas de movimiento se pueden generar los segmentos necesarios para el CDPR no se quede vacío de consignas mientras llega el nuevo dato.

La ecuación (1) muestra el cálculo de segmentos lineales (N_{seg}) que se generan de un punto consigna al siguiente, considerando el tiempo de llegada entre los datos a interpolar (T_{datos}) y el tiempo de ciclo de la tarea de control numérico del controlador industrial ($T_{cicloNC}$).

$$N_{seg} = \left\lceil \frac{T_{datos}}{T_{cicloNC}} \right\rceil + 1 \quad (1)$$

Para este experimento, el tiempo de ciclo de la tarea de control numérico y del cálculo de las consignas de interpolación fue de 2 ms. El desfase entre el movimiento del CDPR y el movimiento de las gafas fue de un total de 166 ms aproximadamente, considerando el filtro de Kalman y la interpolación.

En la Figura 9 se puede observar como la posición Y del CDPR se mantiene progresiva ante la variación escalonada de la posición Y de las gafas de RV.

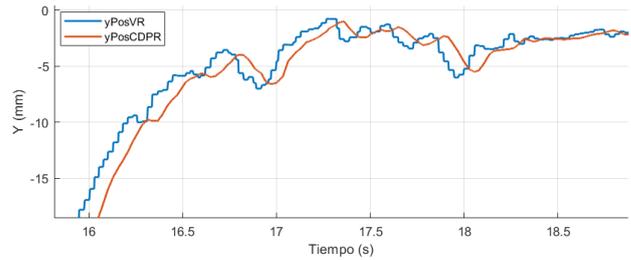


Figura 9: Evolución temporal de la posición de las gafas ("yPosVR") y la posición del robot ("yPosCDPR").

La Figura 10 muestra la trayectoria obtenida con las gafas de RV (azul) y la ejecutada por el CDPR (naranja), con el detalle en una de las zonas curvas. Como se puede ver en la Figura 10, el CDPR es capaz de seguir la señal obtenida por las gafas de RV.

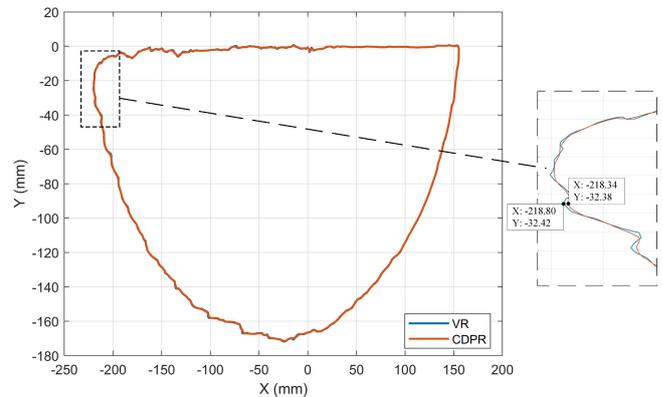


Figura 10: Trayectoria en el espacio (X-Y) realizada por las gafas de RV (azul) y del CDPR (naranja).

Para determinar el error de posicionamiento, se calculó el error absoluto medio, su desviación estándar, y el máximo y mínimo error, eliminando el desfase entre las señales. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos. Para la aplicación del "escenario objetivo 3", donde el CDPR acompaña al paciente, estos valores de errores y latencias se encuentran en rangos admisibles, considerando que la trayectoria realizada abarca un espacio de 370x170 mm, aproximadamente.

Como se aprecia en las Figuras 9 y 10, el movimiento de las gafas está influenciado por numerosas vibraciones. A pesar de la implementación de filtros de señal, estas vibraciones añaden un ruido considerable a las mediciones de posición de las gafas. Esto se atribuye al montaje del robot colaborativo sobre una mesa móvil y al uso de un sistema de soporte para las gafas, el cual fue construido mediante impresión 3D.

Tabla 1: Parámetros estadísticos del error entre la trayectoria 2D comandada de las gafas de RV y la ejecutada por el robot CDPR

Parámetro	Valor
Error promedio	0.534 mm
Desviación estándar error	0.498 mm
Error máximo	5.6299 mm
Error mínimo	0.001 mm

5. Conclusiones

Dentro del trabajo a desarrollar en el proyecto VirtualR3 (que finaliza en marzo de 2025), la correcta interpretación de los impulsos del paciente para modular y generar órdenes hápticas es uno de los aspectos importantes a investigar. La estrategia es la sensorización indirecta a través de las tensiones de los cables de soporte de estructura y de paciente, apoyada por otros dispositivos sobre el propio paciente, como las gafas de RV. Los desarrollos y evaluaciones presentadas en el artículo avalan una integración fluida entre un CDPR y el procesador de RV, y demuestran que el sistema RV puede utilizarse como generador de consignas al sistema de control de movimiento del robot, lo cual es útil en alguno de los escenarios de aplicación.

Cabe destacar que la solución desarrollada en el proyecto VirtualR3 viene a complementar mucha otras ya existentes como por el ejemplo la de los exosqueletos, y puede llegar a ser complementaria coincidiendo en un mismo escenario de aplicación: la robótica CDPR para guiar y sostener como última red de seguridad, y otras soluciones para apoyar en el movimiento concreto de una articulación o la marcha (Brull et al., 2020), (Zhang et al., 2023).

Como trabajo futuro, se plantea reducir las vibraciones de la señal obtenida por las gafas de RV, así como extender la interpolación utilizada a una interpolación *spline* cúbica entre los puntos de las gafas de RV para dotar de mayor fluidez la aplicación de seguidor.

Agradecimientos

El proyecto VirtualR3 está financiado por el proyecto EMIL de apoyo financiero a terceros, financiado por la Unión Europea (UE) (HORIZON-CL4-2021-HUMAN-01-06). No obstante, los puntos de vista y opiniones expresados son exclusivamente los del autor/es y no reflejan necesariamente los de la UE. Ni la UE ni la autoridad que concede las ayudas pueden ser consideradas responsables de las mismas.

Referencias

Barbazza, L., Oscari, F., Minto, S., Rosati, G., 2017. Trajectory planning of a suspended cable driven parallel robot with reconfigurable end effector. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 48, 1–11. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.02.001

Belda-Lois, J.-M., Mena-del Horno, S., Bermejo-Bosch, I., Moreno, J.C., Pons, J.L., Farina, D., Iosa, M., Molinari, M., Tamburella, F., Ramos, A., Caria, A., Solis-Escalante, T., Brunner, C., Rea, M., 2011. Rehabilitation of gait after stroke: a review towards a top-down approach. *J NeuroEngineering Rehabil* 8, 66. DOI:10.1186/1743-0003-8-66

Brull, A., Zubizarreta, A., Cabanes, I., Rodríguez-Larrad, A., 2020. Sensorized tip for monitoring people with multiple sclerosis that require assistive devices for walking. *Sensors* 20, 4329. DOI: 10.3390/s20154329.

Carricato, M., Merlet, J.-P., 2013. Stability Analysis of Underconstrained Cable-Driven Parallel Robots. *IEEE Trans. Robot.* 29, 288–296. DOI:10.1109/TRO.2012.2217795

Clavel, R., 1989. Device for displacing and positioning an element in space. US4976582A.

Delgado-Oleas, G., Romero-Sorozabal, P., Lora-Millan, J., Gutierrez, A., Rocon, E., 2023. Bioinspired Hierarchical Electronic Architecture for Robotic Locomotion Assistance: Application in Exoskeletons. *IEEE Access* 11, 131610–131622. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3336003

Deutsch, J.E., Myslinski, M.J., Kafri, M., Ranky, R., Sivak, M., Mavroidis, C., Lewis, J.A., 2013. Feasibility of Virtual Reality Augmented Cycling for Health Promotion of People Poststroke. *Journal of Neurologic Physical Therapy* 37, 118–124. DOI:10.1097/NPT.0b013e3182a0a078

Díaz, I., Gil, J.J., Sánchez, E., 2011. Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges. *Journal of Robotics* 2011, 1–11. DOI:10.1155/2011/759764

Hamzeheinejad, N., Roth, D., Monty, S., Breuer, J., Rodenberg, A., Latoschik, M.E., 2021. The Impact of Implicit and Explicit Feedback on Performance and Experience during VR-Supported Motor Rehabilitation, in: *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, Lisboa, Portugal, pp. 382–391. DOI:10.1109/VR50410.2021.00061

Hesse, S., Uhlenbrock, D., Werner, C., Bardeleben, A., 2000. A mechanized gait trainer for restoring gait in nonambulatory subjects. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 81, 1158–1161. DOI:10.1053/apmr.2000.6280

Huamanchahua, D., Tadeo-Gabriel, A., Chavez-Raraz, R., Serrano-Guzman, K., 2021. Parallel Robots in Rehabilitation and Assistance: A Systematic Review, in: *2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*. IEEE, New York, NY, USA, pp. 0692–0698. DOI:10.1109/UEMCON53757.2021.9666501

Landsberger, S.E., 1984. Design and construction of a cable-controlled, parallel link manipulator (PhD Thesis). Massachusetts Institute of Technology.

Li, Y., Huang, J., Tian, F., Wang, H.-A., Dai, G.-Z., 2019. Gesture interaction in virtual reality. *Virtual Reality & Intelligent Hardware* 1, 84–112. DOI:10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0006

Luque-Moreno, C., Ferragut-Garcías, A., Rodríguez-Blanco, C., Heredia-Rizo, A.M., Oliva-Pascual-Vaca, J., Kiper, P., Oliva-Pascual-Vaca, A., 2015. A Decade of Progress Using Virtual Reality for Poststroke Lower Extremity Rehabilitation: Systematic Review of the Intervention Methods. *BioMed Research International* 2015, 1–7. DOI:10.1155/2015/342529

Putranto, J.S., Heriyanto, J., Kenny, Achmad, S., Kurniawan, A., 2023. Implementation of virtual reality technology for sports education and training: Systematic literature review. *Procedia Computer Science* 216, 293–300. DOI:10.1016/j.procs.2022.12.139

Qian, S., Zi, B., Shang, W.-W., Xu, Q.-S., 2018. A Review on Cable-driven Parallel Robots. *Chin. J. Mech. Eng.* 31, 66. DOI:10.1186/s10033-018-0267-9

Surdilovic, D., Bernhardt, R., 2004. STRING-MAN: a new wire robot for gait rehabilitation, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04*. 2004. IEEE, New Orleans, LA, USA, pp. 2031–2036 Vol.2. DOI:10.1109/ROBOT.2004.1308122

Zhang, P., Zhang, J., Elsabbagh, A., 2023. Fuzzy radial-based impedance controller design for lower limb exoskeleton robot. *Robotica* 41, 326–345. DOI:10.1017/S0263574722001333

Zhang, Z., Shao, Z., You, Z., Tang, X., Zi, B., Yang, G., Gosselin, C., Caro, S., 2022. State-of-the-art on theories and applications of cable-driven parallel robots. *Front. Mech. Eng.* 17, 37. DOI:10.1007/s11465-022-0693-3