

Jornadas de Automática

Evaluación de una Plataforma Háptica de Realidad Virtual para la Rehabilitación Funcional del Miembro Superior

Cisnal, Ana^{a,*}, Fernández-Jaramillo, Miguel^a, Pérez-Turiel, Javier^a, Fraile, Juan Carlos^a

^a Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Universidad de Valladolid, Paseo Prado de la Magdalena 3-5, 47011, Valladolid, España.

To cite this article: Cisnal, Ana, Jaramillo, Miguel, Pérez-Turiel, Javier, Fraile, Juan Carlos. 2025. Evaluation of an Immersive Haptic Virtual Reality Platform for Upper Limb Functional Rehabilitation. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12151>

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una plataforma de realidad virtual háptica para la rehabilitación funcional del miembro superior, orientada a pacientes con daño cerebral adquirido. La solución integra un dispositivo háptico (TouchTM) con distintos modos de visualización: un monitor convencional y un visor de realidad virtual (HMD). Se diseñaron tres minijuegos con objetivos terapéuticos específicos, implementados en un entorno inmersivo desarrollado con Unity. Se evaluó el rendimiento de 14 participantes sanos en dos condiciones de visualización (2D y HMD), siguiendo un protocolo contrabalanceado. Los resultados muestran que el tipo de visualización influye significativamente en el juego que requiere percepción de profundidad, pero no en los otros dos. Además, los participantes manifestaron altos niveles de satisfacción con la experiencia. Esta plataforma muestra un potencial prometedor para futuras aplicaciones clínicas, aunque se señalan limitaciones como el tamaño reducido de la muestra y del área de trabajo del dispositivo háptico.

Palabras clave: Interacción multimodal, Mecatrónica humano y robot, Tecnología asistencial e ingeniería de rehabilitación, Tecnología robótica, Trabajo en entornos reales y Virtuales.

Evaluation of an Immersive Haptic Virtual Reality Platform for Upper Limb Functional Rehabilitation

Abstract

This work presents the development of a haptic virtual reality platform for upper limb rehabilitation, aimed at patients with acquired brain injury. The system integrates a haptic device (TouchTM) with two visualization modes: a conventional monitor and a head-mounted display (HMD). Three mini-games with specific therapeutic goals were designed and implemented in an immersive environment developed in Unity. Fourteen healthy participants were evaluated under two visualization conditions (2D and HMD) using a counterbalanced protocol. Results indicate that the type of visualization significantly affects performance in tasks requiring depth perception, but not in the other two games. Furthermore, participants reported high levels of satisfaction with the experience. This platform shows promising potential for clinical application, although limitations such as the small sample size and the restricted workspace of the haptic device are acknowledged.

Keywords: Assistive technology and rehabilitation engineering, Human and Robot Mechatronics, Multi-modal interaction, Robotics technology, Work in real and virtual environments.

1. Introducción

En España, más de 435.000 personas sufren de Daño Cerebral Adquirido (DCA), con más de 100.000 nuevos casos reportados anualmente (FEDACE, 2022). La hemiparesia es la secuela más frecuente de esta condición, caracterizada por la disminución de la fuerza muscular en el

hemisferio opuesto al área cerebral dañada. Esta afectación compromete significativamente la movilidad de los miembros superiores en la mayoría de los afectados por DCA, limitando severamente su independencia. Los movimientos de este miembro son críticos para las actividades diarias, lo que subraya la grave repercusión que esta limitación tiene en quienes la padecen. Es por ello de vital importancia encontrar

formas de rehabilitar de forma rápida y efectiva. El uso de tecnologías innovadoras, como la robótica y la realidad virtual, cobra especial relevancia en este contexto, ya que ha demostrado un gran potencial para acelerar y mejorar la recuperación en estos pacientes (Lupu et al., 2024).

Estudios recientes han destacado sus beneficios en términos de compromiso y motivación del usuario (Bortone et al., 2018), retroalimentación en tiempo real y personalización del tratamiento (Hao et al., 2022), (Ghozali, 2024). Además, se ha demostrado su seguridad y aceptación en la práctica clínica (Chatterjee et al., 2022). Con el avance de dispositivos inmersivos accesibles, como Oculus Rift S o HTC Vive, ha crecido el interés en su aplicación para la recuperación motora (Geijtenbeek et al., 2011.), (John & Sangeetha, 2024), (Weber et al., 2019).

La razón fundamental para el desarrollo de aplicaciones basadas en realidad virtual inmersiva radica en el aumento de la sensación de presencia (Sense of Prsence, SoP) que esta tecnología puede proporcionar (Ijsselsteijn & Riva, 2003). La SoP está relacionada con la participación del usuario y con una serie de emociones positivas que desempeñan un papel clave en la adhesión al tratamiento, especialmente en el caso del ictus, donde se recomiendan sesiones repetitivas de alta intensidad (Pollock et al., 2014). La evidencia preliminar sugiere que, cuanto mayor sea el nivel de inmersión proporcionado por la tecnología, mayor será la SoP experimentada por el usuario (Cummings & Bailenson, 2016). Por lo tanto, es plausible plantear que la realidad virtual inmersiva podría representar una herramienta poderosa para la implementación de programas de rehabilitación del miembro superior en supervivientes de ictus. Sin embargo, un mayor grado de inmersividad podría generar efectos secundarios como el cybersickness (Li et al., 2023).

En este contexto, el presente trabajo aborda el diseño y desarrollo de un prototipo basado en la realidad virtual para la rehabilitación funcional del miembro superior, integrando un dispositivo de realimentación háptica Touch™. Este sistema no solo emplea un entorno virtual interactivo, sino que también está diseñado para ofrecer distintos niveles de inmersividad mediante diferentes tipos de visualización, específicamente un monitor convencional y un head-mounted display (HMD), como el Oculus Rift S. El potencial de la inmersividad en la rehabilitación radica en su capacidad para involucrar al usuario de manera más completa, lo que podría traducirse en una mejora en la eficacia de las sesiones de rehabilitación y, en última instancia, en un avance más rápido y efectivo en la recuperación funcional. Este estudio preliminar se centra en evaluar el rendimiento de usuarios sanos en estos entornos de realidad virtual, considerando cómo varía su experiencia de juego en función de la inmersividad proporcionada por los diferentes dispositivos de visualización.

2. Materiales y métodos

En esta sección, se describen detalladamente los materiales utilizados en el estudio, incluyendo la plataforma robótica y los entornos virtuales diseñados para la experimentación. Además, se expone el protocolo experimental implementado, especificando las condiciones y

procedimientos seguidos para garantizar la validez y reproducibilidad de los resultados.

2.1. Plataforma robótica de realidad virtual

La plataforma robótica de realidad virtual utilizada en este estudio se basa en el dispositivo háptico Touch™ de 3D Systems (Figura 1(a)), el cual permite la interacción táctil con el entorno virtual. El Touch™ es un dispositivo semi-profesional con control de fuerza basado en impedancia, que ofrece una actuación de fuerza en tres grados de libertad (gdl) y un sensor de posición en seis grados de libertad, lo que permite un alto nivel de precisión y versatilidad en la experiencia. Su diseño compacto y portátil, con un stylus extraíble y dos botones, lo hace accesible, pero presenta la limitación de un reducido espacio de trabajo (Fig 1.b), lo que restringe la interacción en entornos de realidad virtual más amplios. La tasa de actualización del feedback háptico, que alcanza los 1000 Hz, es significativamente mayor que la del feedback visual (30 Hz), lo que responde a las diferencias en la percepción del tacto y la visión en el cerebro humano. Para garantizar una experiencia fluida, ambos procesos se ejecutan en hilos separados. En cuanto a la visualización, se emplea un monitor convencional (Figura 1(c)) o un dispositivo Head Mounted Display (HMD), específicamente el Oculus Rift S (Figura 1(d)). Este dispositivo permite la presentación de entornos virtuales de alta calidad, contribuyendo a la inmersión del usuario en el entorno de realidad virtual.

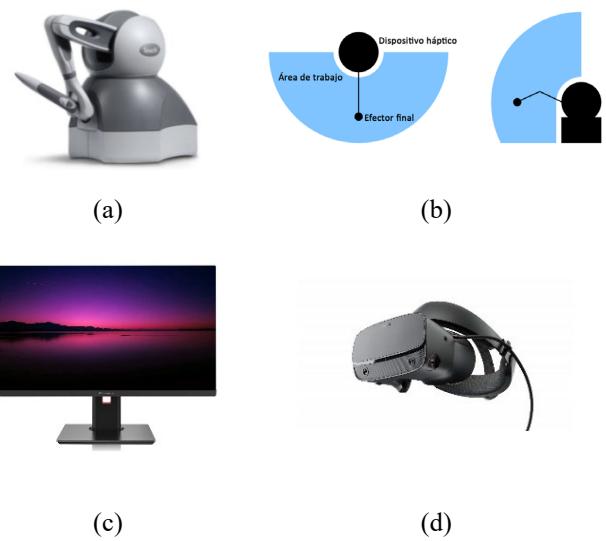


Figura 1: Componentes de la plataforma háptica de realidad virtual. (a) Dispositivo háptico Touch™ (b) Elemento de visualización de tipo pantalla (c) Elemento de visualización de tipo Head Mounted Display (HMD).

2.2. Aplicación de realidad virtual

La aplicación de realidad virtual ha sido desarrollada con el motor gráfico Unity (Unity Technologies) y programada en C#. Esta aplicación (Figura 2) permite la gestión y el registro tanto de usuarios como de sesiones de entrenamiento. Asimismo, ofrece la posibilidad de seleccionar el minijuego a ejecutar y configurarlo según las necesidades específicas del usuario. Durante la experiencia, la aplicación proporciona instrucciones en los momentos requeridos, así como retroalimentación sobre el progreso y los resultados obtenidos.

Además, integra una base de datos que almacena la información de los usuarios y el historial completo de sus sesiones.



Figura 2: Aplicación desarrollada: (a) Menú de usuario; (b) Menú registro; (c) Menú de inicio de sesión; (d) menú de ajustes del juego Lienzo; (e) Menú de selección de minijuegos; (f) Pantalla de instrucciones del juego Lienzo; (g) Pantalla de espera para colocarse el HMD; (h) Pantalla de juego; (i) Pantalla de fin de juego; (j) Pantalla de resultados.

Se han desarrollado tres minijuegos (Figura 2(e)), con distintos niveles de interacción y objetivos terapéuticos:

- **Cubo y botón:** El usuario debe desplazar un cubo hacia una plataforma de su mismo color. Dependiendo del color del cubo, el movimiento requerido varía. Una vez colocado correctamente, debe presionar un botón que reinicia la posición del cubo y cambia su color. Se repite el proceso durante 60 segundos, y la puntuación corresponde al número de cubos transferidos correctamente. Este juego se centra en la percepción espacial.

- **Box and Block Test (BBT):** Recrea la terapia física del mismo nombre dentro del entorno virtual. El usuario dispone de un minuto para trasladar la mayor cantidad posible de cubos de un compartimento de una caja a otro. Los cubos deben ser tomados y movidos de uno en uno. La puntuación se calcula como el número total de cubos correctamente depositados en el compartimento opuesto. Este ejercicio se enfoca en la coordinación y destreza manual.

- **Lienzo:** No implica mover objetos tridimensionales, sino trazar sobre un lienzo virtual. El objetivo es repasar una trayectoria predefinida hasta cubrirla por completo. Se han implementado tres niveles de dificultad: fácil, medio y difícil. El juego finaliza al completar todas las trayectorias. Se enfoca en la precisión del movimiento y el control motriz fino. La puntuación se basa en el tiempo requerido para finalizar el juego.

2.3. Protocolo experimental

El objetivo es evaluar el desempeño de un grupo de usuarios sanos en las diferentes modalidades de juego que ofrece la plataforma, con especial interés el desempeño con un diferente grado de inmersividad. Esto se consigue utilizando distintos tipos de realimentación visual (Figura 3): las Oculus Rift S (se define como HMD) y el monitor convencional (se define como 2D). Para ello se hacen dos grupos, un primer grupo 2D-HMD que primero utilizaran la pantalla y posteriormente, el HDM, y un segundo grupo HMD-2D que utilizaran primero el HDM y posteriormente, la pantalla.



Figura 3: Configuración experimental: (a) Sujeto jugando a un minijuego con la pantalla (2D); (b) Sujeto jugando a un juego con las gafas de realidad virtual (HMD).

Todos los participantes completaron el proceso de evaluación representado en la Figura 4, el cual consiste en: 1) firma documento de consentimiento informado; 2) sesión de familiarización de 5 minutos con el dispositivo háptico Touch™. Los sujetos del grupo 2D-HMD realizan esta sesión de familiarización con la pantalla, mientras que el grupo HMD-2D utilizan el HDM. La sesión de familiarización consiste en un entorno de realidad virtual con bolas de diferentes tamaños y pesos; 3) registro en la aplicación, indicando edad y miembro dominante; 4) sesión de entrenamiento donde el usuario juega a los tres minijuegos (no

se registran los datos) con el Touch y emplean la visualización correspondiente (grupo HMD-2D utiliza el HMD y el grupo 2D-HMD utiliza la pantalla); 5) la primera sesión se registra el desempeño de cada usuario con las mismas condiciones de juego. Al igual que en las sesiones anteriores el dispositivo de visualización depende del grupo; (grupo HMD-2D utiliza el HMD y el grupo 2D-HMD utiliza la pantalla); 6) sesión 2: igual que la sesión 1 pero utilizando el otro dispositivo de visualización, es decir grupo HMD-2D utiliza la pantalla y el grupo 2D-HMD utiliza el HMD; 7) test de satisfacción mediante el The Questionnaire for User Interaction Satisfaction (QUIS™).

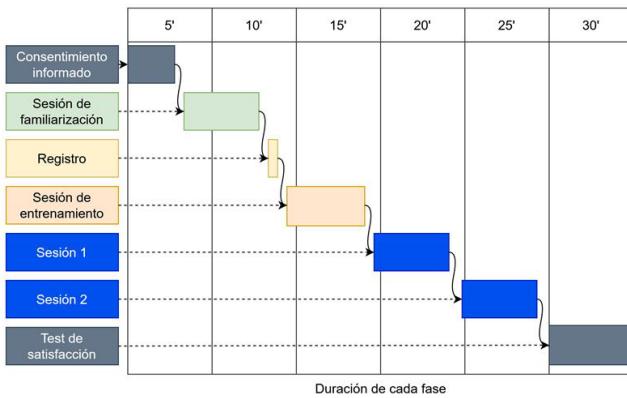


Figura 4: Diagrama de flujo de proceso de evaluación de casa sujeto.

3. Resultados experimentales

En este estudio participaron 14 sujetos sanos (edad media = 26 años, 11 varones y 3 mujeres, todos diestros), quienes realizaron una serie de pruebas utilizando diferentes juegos. Cada sujeto completó tres juegos distintos: *Cubo* y *Botón*, *Lienzo* y *BBT*, bajo dos condiciones de visualización (o display) diferentes: pantalla (2D) y Oculus Rift (HMD). Además, para evitar la posible influencia de la familiarización, se adoptó un diseño contrabalanceado en el cual el orden de las condiciones de display fue alterado entre los participantes. De esta manera, la mitad de los sujetos comenzaron con la condición 2D y luego pasaron a HMD, mientras que la otra mitad siguió el orden inverso. Se registró la puntuación (score) de cada juego y se examinó el impacto de varias variables: sujeto, orden y display sobre el rendimiento.

4.1. Análisis estadístico

Para evaluar la normalidad de las puntuaciones obtenidas en cada uno de los juegos, se utilizó el test de Shapiro-Wilk. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: para el juego *Cubo*, el estadístico de la prueba fue 0.969 (*p*-valor = 0.554); para *Lienzo*, el estadístico fue 0.965 (*p*-valor = 0.460); y para *BBT*, el estadístico fue 0.973 (*p*-valor = 0.678). Dado que todos los *p*-valores superan el umbral de significancia de 0.05, se concluye que las puntuaciones en los tres juegos siguen una distribución normal.

Se utilizó un modelo lineal mixto para evaluar el impacto de las variables "Orden" y "Display" y "Sesión" sobre las puntuaciones de los diferentes juegos. El sujeto fue considerado como efecto aleatorio. Para el cubo, los resultados mostraron que el orden de presentación no tuvo un

efecto significativo (*p* = 0.228), mientras que el tipo de gafas (HMD vs 2D) sí tuvo un efecto significativo (*p* = 0.003). La sesión no mostró un efecto significativo (*p* = 0.544). La varianza entre sujetos fue 31.808, indicando variabilidad en las puntuaciones.

En el caso del juego *Lienzo*, ninguno de los factores analizados presentó un efecto significativo: el orden de presentación (*p* = 0.758), el tipo de gafas (HMD vs 2D) (*p* = 0.258), ni la sesión (*p* = 0.231) afectaron significativamente las puntuaciones. Además, la varianza entre sujetos fue de 131.016, lo que refleja una mayor variabilidad en las puntuaciones en comparación con el juego *Cubo*.

Para el juego *BBT*, los resultados del modelo lineal mixto indicaron que ninguna de las variables analizadas tuvo un efecto significativo sobre las puntuaciones. En particular, el orden de presentación (*p* = 0.441), el tipo de gafas (HMD vs 2D) (*p* = 0.634) y la sesión (*p* = 0.320) no mostraron influencia estadísticamente significativa en el rendimiento de los participantes. La varianza entre sujetos fue de 239.356, lo que sugiere una alta variabilidad individual en las puntuaciones de este juego.

Se ha observado que la variable "Display" influye significativamente en el resultado, pero únicamente en el juego del cubo. Para evaluar las diferencias entre las condiciones de visualización, se empleó un *t*-test de muestras pareadas. Este test estadístico permite evaluar si existen diferencias significativas en las puntuaciones obtenidas en dos condiciones dentro del mismo grupo de sujetos, y los resultados se muestran en la Figura 5. Para el juego *Cubo*, se encontró una diferencia significativa en las puntuaciones en función del tipo de visualizador (*t* = -3.015, *p* = 0.009). Sin embargo, en el juego *Lienzo*, no se observó una diferencia significativa entre los displays 2D y HMD (*t* = 1.114, *p* = 0.286), ni en el juego *BBT* se encontraron diferencias significativas (*t* = -0.475, *p* = 0.642), lo cual concuerda con el análisis previo.

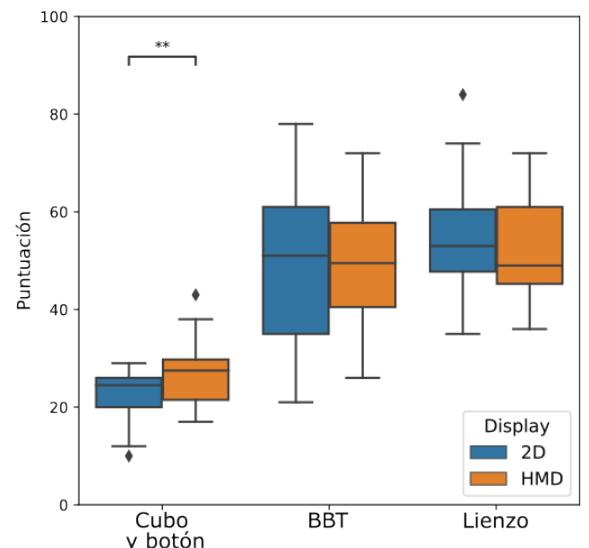


Figura 5: Distribución de las puntuaciones en los diferentes juegos en función del tipo de visualización.

La correlación entre los resultados obtenidos por los sujetos utilizando 2D y HMD fue alta en el juego *BBT* (*r* = 0.95),

moderada en *Lienzo* ($r = 0.80$) y más baja en *Cubo y botón* ($r = 0.70$).

4.2. Satisfacción de los participantes

Cada participante completó un cuestionario de satisfacción con el objetivo de evaluar de forma subjetiva la interacción humano-computadora. Para ello, se empleó el QUIST™, que utiliza una escala de 1 a 7 para evaluar 6 aspectos generales y 21 aspectos específicos de la experiencia de uso.

Los resultados correspondientes a los aspectos generales se presentan en la Figura 6(a), con las siguientes puntuaciones medias (\pm desviación estándar):

- *Maravillo/terrible*: 5.77 ± 0.73
- *Fácil/difícil*: 5.85 ± 1.41
- *Satisfactorio/frustrante*: 5.38 ± 1.45
- *Adecuado/inadecuado*: 5.75 ± 1.22
- *Estimulante/aburrido*: 5.62 ± 1.66
- *Flexible/rígido*: 4.64 ± 1.43 .

Además, la reacción general hacia el sistema obtuvo una puntuación promedio de 5.5 ± 1.35 . A continuación se detallan las valoraciones obtenidas para cada ítem:

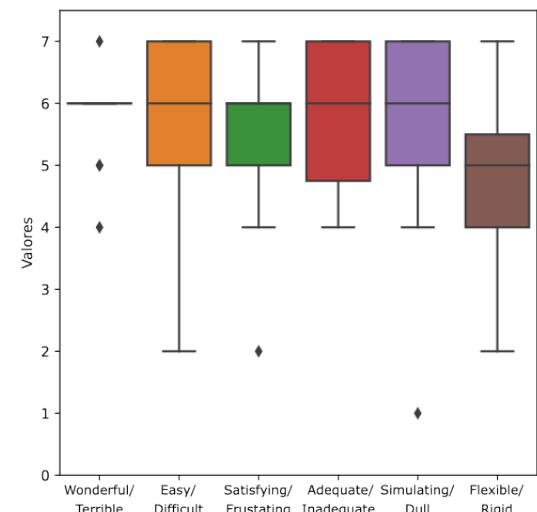
- *Resaltar simplifica la tarea*: 5.58 ± 1.73
- *Organización de la información*: 6.08 ± 0.90
- *Secuencia de pantallas*: 6.08 ± 0.95
- *Uso de términos a lo largo del sistema*: 6.30 ± 1.06
- *Terminología relacionada con la tarea*: 5.45 ± 1.69
- *Posición de los mensajes en pantalla*: 6.23 ± 0.93
- *Solicitudes para la entrada*: 5.92 ± 1.08
- *El ordenador informa sobre su progreso*: 6.38 ± 0.77
- *Mensajes de error*: 4.75 ± 1.16
- *Aprender a operar el sistema*: 6.00 ± 1.47
- *Explorar nuevas funciones por prueba y error*: 5.91 ± 1.14
- *Recordar nombres y el uso de comandos*: 6.27 ± 1.19
- *Realizar tareas es sencillo*: 6.15 ± 0.69
- *Mensajes de ayuda en pantalla*: 4.82 ± 1.47
- *Materiales de referencia suplementarios*: 4.56 ± 1.01
- *Velocidad del sistema*: 6.38 ± 0.87
- *Fiabilidad del sistema*: 5.85 ± 1.21
- *El sistema tiende a ser*: 6.62 ± 0.65
- *Corregir tus errores*: 5.08 ± 1.04
- *Diseñado para todos los niveles de usuarios*: 5.62 ± 1.56

4. Discusión

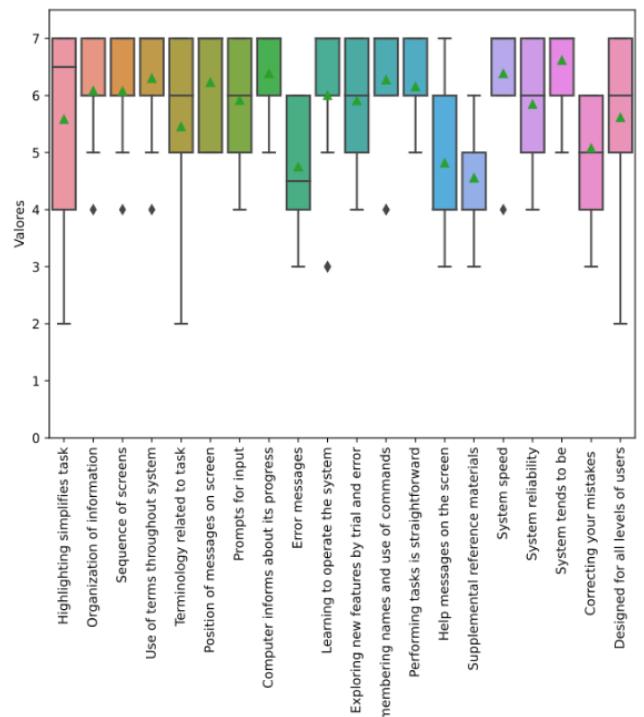
Este proyecto ha logrado desarrollar un juego funcional y atractivo con potencial para ser utilizado en la práctica clínica, destacando por su realismo y la incorporación de sensación háptica, mediante la plataforma Touch™. Además, se ha evaluado la plataforma utilizando un monitor convencional y las Oculus Rift S.

El análisis realizado reveló que el tipo de visualización influye de manera significativa en las puntuaciones obtenidas en el juego *Cubo y botón*, observándose un rendimiento superior con el uso de las Oculus Rift S (HMD) en comparación con el monitor convencional (2D). Sin embargo, en los juegos *Lienzo* y *BBT* no se detectaron

diferencias significativas en función del tipo de visualización.



(a)



(b)

Figura 6: Resultados del Questionnaire for User Interaction Satisfaction (QUIST): (a) aspectos generales y (b) aspectos específicos.

Esta discrepancia puede explicarse por las características específicas de cada juego. El juego *Cubo* es el único en el que el desempeño del participante depende en mayor medida de la percepción de profundidad, ya que las plataformas donde se colocan los cubos están situadas a distintas alturas (Figura 2e). Cuatro plataformas se encuentran más adelantadas, mientras que las otras cuatro están situadas en el fondo, lo que requiere de una adecuada percepción tridimensional para posicionar los cubos correctamente. En contraste, en el juego *BBT*, aunque existe cierta profundidad, no se requiere un control preciso

sobre esta, ya que los cubos pueden colocarse a cualquier altura dentro de la caja. De igual manera, en el juego *Lienzo*, no se presenta un componente de profundidad, ya que el objetivo consiste en pintar sobre un lienzo bidimensional. En este caso, el jugador experimenta una sensación táctil al interactuar con el lienzo, generada por el feedback haptico proporcionado por el dispositivo Touch™.

En cuanto a la satisfacción de los usuarios obtenida utilizando el QUIST, este estudio preliminar ha mostrado resultados prometedores. La puntuación total media de los aspectos generales fue de 5.5 ± 1.35 en la escala de Likert. La característica general con peor puntuación media fue la flexibilidad (4.64 ± 1.43), mientras que la mejor puntuación fue para la facilidad (5.85 ± 1.41). Para los aspectos específicos, la puntuación media fue de 5.73 ± 1.26 . Los participantes destacaron aspectos como la velocidad y la fiabilidad del sistema, así como la claridad en la organización y la facilidad de uso, mientras que aspectos como los mensajes de error y los materiales supplementarios recibieron puntuaciones más bajas.

No obstante, se identifican varios aspectos susceptibles de mejora, tales como la optimización de las físicas del juego, la ampliación de la variedad de minijuegos disponibles y el desarrollo de un sistema en la nube que permita a los usuarios acceder a sus datos y registros de rendimiento. Asimismo, se reconocieron limitaciones relacionadas con la potencia estadística de los contrastes, debido al tamaño reducido de la muestra y al hecho de haber utilizado únicamente sujetos sanos, lo que limita la generalización de los resultados. Además, se destacaron restricciones inherentes al dispositivo haptico Touch™, especialmente su limitado espacio de trabajo, lo cual restringe la funcionalidad del dispositivo para tareas de rehabilitación, dado que el rango de movimiento del miembro superior del usuario se ve considerablemente reducido. Estas limitaciones podrían ser abordadas mediante el aumento del tamaño de la muestra, la inclusión de pacientes en futuros estudios clínicos y la sustitución del dispositivo haptico por uno con un mayor rango de trabajo.

5. Conclusiones

La plataforma desarrollada ha tenido buena aceptación por parte de los usuarios. Los resultados del estudio sugieren que el tipo de visualización tiene un impacto notable en el rendimiento de los participantes en el juego *Cubo*, posiblemente debido a la necesidad de un control más preciso de la profundidad en dicho entorno virtual. Futuros estudios deben realizarse con el público objetivo de esta plataforma.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de Ministerio de España de Ciencias, Innovación y Universidades a través del proyecto PID2022-138206OB-C33.

Referencias

- Bortone, I., Leonardis, D., Mastronicola, N., Crecchi, A., Bonfiglio, L., Procopio, C., Solazzi, M., Frisoli, A., 2018. Wearable haptics and immersive virtual reality rehabilitation training in children with neuromotor impairments. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 26(7), 1469–1478. DOI: 10.1109/TNSRE.2018.2846814
- Chatterjee, K., Buchanan, A., Cottrell, K., Hughes, S., Day, T. W., John, N. W., 2022. Immersive virtual reality for the cognitive rehabilitation of stroke survivors. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 30, 719–728. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3158731
- Cummings, J. J., Bailenson, J. N., 2016. How immersive is enough? A meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence. *Media Psychology* 19(2), 272–309. DOI: 10.1080/15213269.2015.1015740
- FEDACE (Federación Española de Daño Cerebral), 2022. Cifras del Daño Cerebral Adquirido en España. FEDACE, Madrid. Disponible en: https://fedace.org/cifras_dano_cerebral
- Geijtenbeek, T., Steenbrink, F., Medical, M., Otten, B. V. B., Even-Zohar, O., 2011. D-Flow: Immersive virtual reality and real-time feedback for rehabilitation. DOI: 10.1145/2087756.2087785
- Ghozali, M. T., 2024. The effectiveness of virtual reality (VR)-assisted physical and cognitive rehabilitation on stroke recovery: A mini systematic review. *Proceedings, International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering, ICECIE*, DOI: 10.1109/ICECIE63774.2024.10815687
- Hao, J., Xie, H., Harp, K., Chen, Z., Siu, K. C., 2022. Effects of virtual reality intervention on neural plasticity in stroke rehabilitation: A systematic review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 103(3), 523–541. DOI: 10.1016/j.apmr.2021.06.024
- Ijsselsteijn, W., Riva, G., 2003. Being there: Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments. IOS Press, Amsterdam.
- John, N. M., Sangeetha, R., 2024. Stroke rehabilitation using virtual reality. *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing, ICAAIC 2024*, 1033–1040. DOI: 10.1109/ICAAIC60222.2024.10575410
- Li, X., Luh, D. B., Xu, R. H., An, Y., 2023. Considering the consequences of cybersickness in immersive virtual reality rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Applied Sciences (Switzerland)* 13(8). DOI: 10.3390/app13085159
- Lupu, R. G., Burlacu, A., Catarama, O., Sopot, I., 2024. Robotic assisted immersive therapy system for stroke rehabilitation. *2024 12th E-Health and Bioengineering Conference, EHB 2024*. DOI: 10.1109/EHB64556.2024.10805727
- Pollock, A., Farmer, S. E., Brady, M. C., Langhorne, P., Mead, G. E., Mehrholz, J., van Wijck, F., 2014. Interventions for improving upper limb function after stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2014(11). DOI: 10.1002/14651858.CD010820.pub2
- Weber, L. M., Nilsen, D. M., Gillen, G., Yoon, J., Stein, J., 2019. Immersive virtual reality mirror therapy for upper limb recovery after stroke: A pilot study. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation* 98(9), 783–788. DOI: 10.1097/PHM.0000000000001190