

M3Display: Sistema de realidad aumentada para la rehabilitación de la función motora del miembro superior

A. Cisnal¹, G. Alonso-Linaje¹, M. Veganzones¹, J.P. Turiel¹, J.C. Fraile¹

¹ Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción (ITAP), Universidad de Valladolid, Valladolid, España, cisnal@ieee.org.

Resumen

Se presenta un sistema basado en realidad aumentada para la rehabilitación de la función del miembro superior en pacientes con discapacidad motora. Este sistema utiliza la tecnología de realidad aumentada para combinar elementos virtuales con el mundo real, mejorando así la experiencia del usuario. El sistema se compone de una cámara que captura el entorno real a través de la reflexión de un espejo ubicado detrás de la pantalla de visualización. A través de un algoritmo de segmentación en tiempo real, las imágenes obtenidas mediante la cámara son analizadas para detectar las manos del paciente. Posteriormente, se realiza un procesamiento adicional que permite la creación del entorno de realidad aumentada mediante la integración de diversos elementos virtuales con las manos detectadas y la imagen original capturada. Además, incorpora una interfaz de usuario que permite una interacción sencilla e intuitiva con el sistema. Esta interfaz está compuesta por seis juegos serios diseñados específicamente para la rehabilitación del miembro superior. Este sistema ofrece una solución innovadora y prometedora para la rehabilitación de la función del miembro superior en pacientes con discapacidad motora. Al combinar la tecnología de realidad aumentada con juegos serios diseñados para la rehabilitación, se brinda a los pacientes una experiencia de rehabilitación más motivadora y efectiva.

1. Introducción

En el ámbito de la rehabilitación neuromotora, se ha observado un creciente interés en el uso de plataformas robóticas. Esta tecnología permite a los pacientes llevar a cabo su rehabilitación sin depender de una asistencia continua del personal médico, lo que amplía la accesibilidad a los programas de rehabilitación física. Esta cuestión es de vital importancia, especialmente ante la proyección de una reducción sustancial en la relación entre terapeutas y pacientes en las próximas décadas debido al envejecimiento de la población.

Numerosos estudios han demostrado que la rehabilitación basada en robots, en comparación con otros enfoques más tradicionales, mantiene a los pacientes motivados a través de la utilización de entornos de realidad virtual (RV) y realidad aumentada (RA) en combinación con técnicas de gamificación [1].

Sin embargo, el alto coste de los robots de rehabilitación dificulta su adquisición para el uso en el hogar por parte de los propios pacientes. Esto es una gran desventaja ya que se ha demostrado que una rehabilitación intensiva y temprana es de vital importancia para maximizar la recuperación motora funcional [2].

En este contexto, han surgido sistemas basados en RV y RA que permiten una rehabilitación motora sin necesi-

dad de un dispositivo robótico adicional. Estos sistemas potencialmente aumentarían la motivación del usuario, lo cual es un factor clave en el proceso de recuperación motora [3].

La Realidad Aumentada (RA) es el conjunto de tecnologías que permite al usuario visualizar el mundo real en combinación con objetos virtuales a través de una pantalla única. Para conseguir la superposición de elementos virtuales, un sistema de RA debe estar formado, por lo general, por los siguientes elementos: (1) Elemento de captura: dispositivo hardware que capta la imagen del mundo real; (2) Procesador: elemento hardware que combina la imagen del mundo real con la información virtual que debe superponer; (3) Software: programa informático específico que gestiona este proceso; (4) Dispositivo de visualización: dispositivo hardware que muestra los elementos del mundo real superpuestos con los elementos de la realidad aumentada; (5) Marcadores o detección de objetos: patrones visuales predefinidos del mundo real o algoritmos de detección de objetos que permite la superposición precisa de elementos virtuales en el entorno real.

En esta comunicación, se presenta M3Display, un sistema de RA diseñado específicamente para su utilización en terapias de rehabilitación del miembro superior. El sistema utiliza como dispositivo de visualización una pantalla, en lugar de gafas de RV utilizadas comúnmente en este campo [4, 5]. Esta elección se basa en las investigaciones que han demostrado que el uso de dispositivos voluminosos e invasivos, pueden generar estrés en los pacientes [6].

Por otro lado, estudios previos [7, 8] han propuesto sistemas de rehabilitación basados en RA que emplean marcadores (Figura 1). Aunque se demostró que la superposición de objetos virtuales genera una motivación positiva en los pacientes, se concluyó que la percepción visual de la profundidad y el sistema de seguimiento debían ser mejorados.

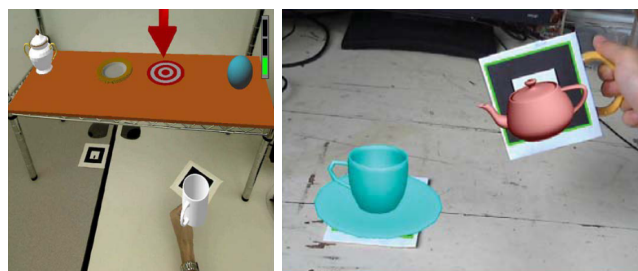


Figura 1: Sistemas de rehabilitación basados en RA que utilizan marcadores [7, 8].

Además, cabe destacar que la aplicación de marcadores en pacientes puede tener efectos adversos, dado que la mayoría de las personas que han experimentado un accidente cerebrovascular presentan espasticidad en la mano. Como alternativa, se propone el empleo de algoritmos de detección de objetos, los cuales, a pesar de ser computacionalmente más complejos y más susceptibles a errores, ofrecen la gran ventaja de prescindir de dichos marcadores.

El sistema de RA desarrollado se basa en un algoritmo de detección precisa de objetos, con un enfoque particular en la identificación de la mano. En la sección 2, se proporciona una descripción de los componentes de hardware que integran el sistema, así como su disposición espacial. En la sección 3, se explora el software desarrollado para la detección de la mano. Además, se presentan los juegos serios incorporados en el sistema, los cuales han sido diseñados para potenciar la eficacia y el compromiso del paciente durante las sesiones de rehabilitación. Por último, se lleva a cabo una breve discusión sobre el sistema desarrollado y se presentan las conclusiones derivadas de este estudio.

2. Hardware

El sistema se compone de una cámara Logitech HD Pro C920 (resolución de 1920 x 1080 a 30 fps y campo visual diagonal de 78°), un ordenador Intel Core i5 11400 CPU (6 núcleos, 2.6 GHz, 16GB de RAM) y una pantalla de 27" (Philips 273V7QDSB, resolución 1920 x 1080, @75 Hz). Esta pantalla es elegida por su peso ligero de 4 kg y su perfil de tan solo 45 mm de profundidad. Además, el sistema incluye un espejo de dimensiones 380 x 550 mm, un soporte para la pantalla y otros componentes auxiliares para la unión de los diferentes elementos. Estos componentes auxiliares pueden ser tanto comerciales como impresos en 3D para cumplir con los requisitos específicos del sistema.

La configuración del sistema se muestra en la Figura 2a. La pantalla se coloca en una posición perpendicular a la visión del paciente, situada entre este y sus manos. Un mecanismo permite la colocación del espejo detrás de la pantalla. En la parte trasera de la estructura se encuentra una cámara que captura el movimiento de las manos del paciente a través de la reflexión proporcionada por el espejo. Para asegurar la cámara en su posición, se emplea una estructura ubicada en la parte posterior de la pantalla.

Con el fin de garantizar una representación sin distorsiones de la mano en la pantalla, se requiere una colocación precisa de la cámara. Esta se posiciona estratégicamente en un ángulo de inclinación de 45 grados con respecto a la normal del espejo y se dirige hacia el centro del mismo (Figura 2b). De esta manera, se logra una superposición efectiva entre la línea de visión del paciente y la imagen capturada por la cámara. Como resultado, se genera la ilusión de que el brazo del paciente se extiende de manera ininterrumpida a través de la pantalla (Figura 2c).

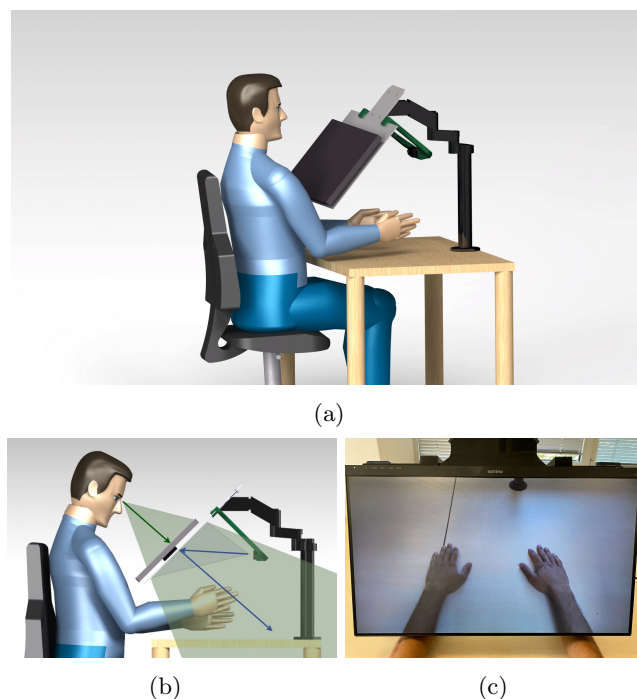


Figura 2: Estructura de M3Display. (a) Configuración del sistema; (b) Obtención de la imagen por medio del espejo y disposición de la cámara; (c) Prolongación de la mano de forma continua a través de la pantalla.

3. Software

El software consiste en una herramienta para la detección de manos en tiempo real y una serie de juegos en un entorno de RA reunidos en un interfaz de usuario. Estos dos módulos se presentan en los apartados 3.1 y 3.2 respectivamente.

3.1. Procesado de Imágenes

Las imágenes tomadas por la cámara se procesan inicialmente para detectar manos, seguido por un procesamiento adicional para construir el entorno de realidad aumentada a partir de ensamblar diferentes componentes del entorno virtual con las manos detectadas y la imagen original.

La detección de manos se realiza con una herramienta ligera que, a partir de los puntos de referencia obtenidos por MediaPipe Hands [9], obtiene una segmentación semántica precisa y computacionalmente sencilla. Esta herramienta permite segmentar manos hasta una velocidad de 90 fps, cumpliendo el requerimiento de funcionar en tiempo real impuesto por su uso en aplicaciones de RA.

La segmentación semántica se realiza en varias etapas, comenzando por la extracción de puntos de referencia por MediaPipe Hands [9], mostrados en la Figura 3b junto con el esqueleto que definen. La información extraída se procesa aplicando una serie de operaciones lógicas y morfológicas para transformar los puntos de referencia en un esqueleto de la estructura de la mano, y de ahí a una segmentación precisa. Partir del procesamiento de MediaPipe Hands permite conseguir gran precisión, y utilizar una secuencia de operaciones lógicas y

morfológicas produce un algoritmo computacionalmente ligero por encima de MediaPipe Hands, que es un software altamente optimizado.

Las operaciones lógicas y morfológicas aplicadas comienzan por dilataciones con kernels cuadrados de gran tamaño sobre el esqueleto de la estructura de la mano para conseguir una primera aproximación a la segmentación final. A continuación se realiza un muestreo del color en varios puntos cercanos al esqueleto de la mano para definir umbrales en el espacio de representación CIELAB (espacio de colores que ha permitido obtener la mayor precisión en el conjunto de datos de test tras probar varias alternativas) con los que distinguir puntos de la mano y del fondo, y así realizar un ajuste fino de las máscaras de segmentación obtenidas en el paso anterior. Un ejemplo de segmentación obtenida con esta herramienta se muestra en la Figura 3.

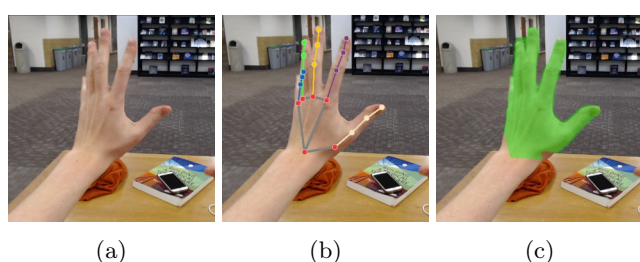


Figura 3: Etapas de la segmentación. (a) Imagen a segmentar; (b) Salida de MediaPipe Hands; (c) Segmentación obtenida.

Este algoritmo hace posible implementar juegos de RA controlados con una mano de forma sencilla. Nótese que el hecho de realizar segmentación semántica dificulta el utilizar más de una mano en los juegos. Es posible adaptar el algoritmo para realizar segmentación de instancias, ya que MediaPipe Hands distingue manos independientes, a costa de aumentar la carga computacional del algoritmo.

3.2. Interfaz de Usuario

El sistema cuenta con una colección de juegos de realidad aumentada que tienen como motor de segmentación el algoritmo mostrado en el apartado 3.1. Estos juegos se recogen en un interfaz de usuario (Figura 4) para facilitar el acceso a los mismos y permitir interrelacionar diferentes ejecuciones de los juegos mediante el uso de perfiles de usuario y registros de ejecuciones pasadas. Esto permite adaptar a cada paciente la dificultad de los juegos en función de su desempeño.

Los juegos desarrollados están orientados a la rehabilitación del miembro superior en personas con discapacidad motora. Por ello, todos los juegos se han diseñado de tal forma que la mano tome un papel protagonista y activo en el juego. De esta forma se involucra al paciente en la terapia induciendo que realice movimientos con su miembro superior de forma inadvertida. Esto se consigue utilizando la mano como elemento de interacción entre el paciente y el entorno virtual en el que se le introduce. Los juegos desarrollados (Figura 5) entran dentro de la categoría de juegos serios. El objetivo en estos juegos es

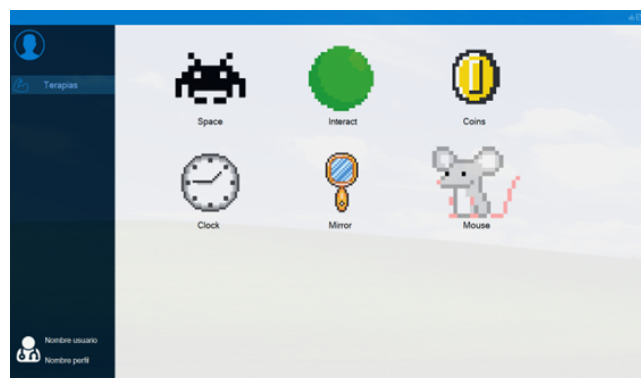


Figura 4: Interfaz de usuario de M3Display.

eliminar todos los objetivos que aparecen en la pantalla controlando una nave que dispara (Figura 5a), interactuar con una pelota virtual (Figura 5b), perseguir un ratón que huye de la mano introducida (Figura 5c), y alcanzar la posición del reloj indicada en cada instante (Figura 5d).

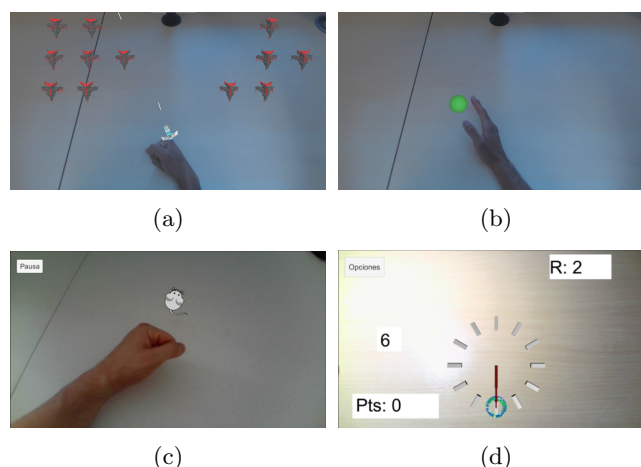


Figura 5: Juegos serios desarrollados. (a) Space; (b) Interact; (c) Mouse; (d) Clock.

4. Discusión y conclusiones

La presente comunicación se ha centrado en la descripción del sistema de RA utilizado en terapias de rehabilitación del miembro superior. Sin embargo, es importante destacar que este sistema posee una versatilidad significativa.

El sistema permite la incorporación de una plataforma robotizada (p. ej. RobHand [10] o M3Rob [11]) para asistir en el movimiento de la mano y/o muñeca del paciente. Esto es de especial importancia en la primera etapa de la rehabilitación cuando la movilidad del paciente es limitada. Con este fin, se desarrolló un algoritmo de segmentación semántica capaz de identificar los elementos mecatrónicos presentes en los entornos controlados de rehabilitación [12], permitiendo así eliminar la presencia del robot en la imagen y proporcionar al paciente una percepción visual alterna.

Por otro lado, el sistema también ofrece la posibilidad de llevar a cabo terapias en espejo. En lugar de utilizar un espejo colocado perpendicularmente entre ambas

manos, se posicionan las manos sobre una superficie y la pantalla muestra la imagen de la mano no afectada mientras la mano parética se sustituye por la imagen en espejo de la mano no afectada. Por ejemplo, se solicita a un paciente que realice movimientos simétricos con ambas manos. De esta manera, un paciente con una deficiencia en el lado izquierdo visualizará su mano derecha sana en el lado derecho de la pantalla, mientras que en el lado izquierdo de la pantalla verá reflejada su mano derecha. Esto crea la impresión de que la mano derecha no afectada, que se muestra reflejada en el lado izquierdo de la pantalla, es en realidad la mano izquierda funcional nuevamente. Esta idea ha sido planteada en estudios previos [5, 13, 14, 15].

El presente proyecto se encuentra actualmente en una etapa de desarrollo activo. Los próximos pasos a seguir comprenden la ampliación de la gama de juegos serios disponibles en el sistema, así como la realización de un análisis exhaustivo de riesgos y usabilidad. Posteriormente, se llevarán a cabo ensayos clínicos con el fin de evaluar la eficacia del dispositivo en cuestión.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del proyecto RTC2019-007350-1 y por la empresa TICCYL Digital S.L.U. Además, este trabajo ha sido respaldado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, mediante el proyecto PID2019-111023RB-C33 y por la Junta de Castilla y León por las ayudas para financiar la contratación predoctoral de personal investigador, cofinanciadas por el Fondo Social Europeo (FSE). Por último, nos gustaría agradecer las ideas y sugerencias de los profesionales del Instituto de Rehabilitación Funcional (IRF) La Salle de Madrid.

Referencias

- [1] Omar Mubin, Fady Alnajjar, Nalini Jishtu, Belal Alsinglawi, and Abdullah Al Mahmud. Exoskeletons with virtual reality, augmented reality, and gamification for stroke patients' rehabilitation: Systematic review. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, 6(2):1–11, 2019.
- [2] Franziska Herpich and Fred Rincon. Management of Acute Ischemic Stroke. *Critical Care Medicine*, 48(11):1654–1663, 11 2020.
- [3] Mónica S. Cameirão, Sergi Bermúdez I. Badia, and Paul F.M.J. Verschure. Virtual reality based upper extremity rehabilitation following stroke: A review. *Journal of Cyber Therapy and Rehabilitation*, 1(1):63–74, 2008.
- [4] Andrea Turolla, Mauro Dam, Laura Ventura, Paolo Tonin, Michela Agostini, Carla Zucconi, Pawel Kiper, Annachiara Cagnin, and Lamberto Piron. Virtual reality for the rehabilitation of the upper limb motor function after stroke: A prospective controlled trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 10(1):1–9, 2013.
- [5] Jörg Trojan, Martin Diers, Xaver Fuchs, Felix Bach, Robin Bekrater-Bodmann, Jens Foell, Sandra Kamping, Mariela Rance, Heiko Maaß, and Herta Flor. An augmented reality home-training system based on the mirror training and imagery approach. *Behavior Research Methods*, 46(3):634–640, 2014.
- [6] Guozheng Xu, Xiang Gao, Lizheng Pan, Sheng Chen, Qiang Wang, Bo Zhu, and Jinfei Li. Anxiety detection and training task adaptation in robot-assisted active stroke rehabilitation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(6):1–18, 2018.
- [7] Wang Ying and Wang Aimin. Augmented reality based upper limb rehabilitation system. *ICEMI 2017 - Proceedings of IEEE 13th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, 2018-Janua:426–430, 2017.
- [8] Atif Alamri, Jongeun Cha, and Abdulmotaleb El Sadik. AR-REHAB: An augmented reality framework for poststroke-patient rehabilitation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(10):2554–2563, 2010.
- [9] Fan Zhang, Valentin Bazarevsky, Andrey Vakunov, Andrei Tkachenka, George Sung, Chuo-Ling Chang, and Matthias Grundmann. MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking, June 2020.
- [10] Ana Císnal, Víctor Lobo, Víctor Moreno, Juan C. Fraile, Rubén Alonso, and Javier P. Turiel. RobHand, un exoesqueleto de mano para la rehabilitación neuromotora aplicando terapias activas y pasivas. In *Actas de las XXXIX Jornadas de Automática*, volume 2, pages 34–41, Badajoz, 2018. Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Extremadura.
- [11] Ana Císnal, Víctor Martínez-Cagigal, Gonzalo Alonso-Linaje, Selene Moreno-Calderón, Javier Pérez Turiel, Roberto Hornero, and Juan Carlos Marinero Fraile. An Overview of M3Rob, a Robotic Platform for Neuro-motor and Cognitive Rehabilitation Using Augmented Reality. In *XL Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, pages 180–183, Valladolid, 2022.
- [12] G. Sánchez-Brizuela, D. Sierra-Rodríguez, E. de la Fuente-López, J.C. Fraile, and J. Pérez-Turiel. Segmentación semántica de elementos mecánicos en entornos aumentados de rehabilitación. In Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, editor, *Jornadas de Robótica, Educación y Bioingeniería*, Málaga, 5 2022.
- [13] Simon Hoermann, Luara Ferreira dos Santos, Nadine Morkisch, Katrin Jettkowski, Moran Sillis, Hemakumar Devan, Parimala S. Kanagasabai, Henning Schmidt, Jörg Krüger, Christian Dohle, Holger Regenbrecht, Leigh Hale, and Nicholas J. Cutfield. Computerised mirror therapy with Augmented Reflection Technology for early stroke rehabilitation: clinical feasibility and integration as an adjunct therapy. *Disability and Rehabilitation*, 39(15):1503–1514, 2017.
- [14] Simon Hoermann, Leigh Hale, Stanley J. Winsler, and Holger Regenbrecht. Patient engagement and clinical feasibility of Augmented Reflection Technology for stroke rehabilitation. *International Journal on Disability and Human Development*, 13(3):355–360, 2014.
- [15] Holger Regenbrecht, Simon Hoermann, Claudia Ott, Lavell Muller, and Elizabeth Franz. Manipulating the experience of reality for rehabilitation applications. *Proceedings of the IEEE*, 102(2):170–184, 2014.