

Sistema de asistencia terapéutica para rehabilitación de manos

A. Spahn, I. Falchini, V. Zacarías, C. Martínez, E. Albornoz^(*)

*sinc(i): Instituto de investigación en señales, sistemas e inteligencia computacional
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral -CONICET*

^(*)emalbornoz@sinc.unl.edu.ar

Resumen

En los últimos años, cada vez más las terapias de rehabilitación neurofisiológicas se realizan con la ayuda de sistemas asistivos que permiten interacciones amigables con los pacientes. En este sentido, muchas se orientan a desafíos, juegos o interacciones que intentan captar la atención del paciente y generar un escenario agradable para la realización de rutinas. La "terapia de espejo" es utilizada para rehabilitar la movilidad de manos y dedos de pacientes que han sufrido accidentes cerebro-vasculares. Aquí se presentan algunos avances en el desarrollo de un entorno virtual que facilite la terapia de espejo, con el que se pretende mejorar la experiencia del usuario, incorporando una mayor interactividad mediante situaciones lúdicas para inducir la motivación y potencialmente promover la telemedicina.

1. Introducción

Las lesiones cerebrales traumáticas y los accidentes cerebrovasculares (ACV) son las principales causas de discapacidad¹, y sus consecuencias se manifiestan en la capacidad de respuesta excitatoria, el nivel general de actividad, la motivación, el estado de ánimo y la cognición, entre otras. Cuando estos deterioros se mantienen o incrementan en el tiempo, producen problemas en las relaciones interpersonales, la adaptación social, depresión, ansiedad, provocan un círculo vicioso de aislamiento, etc. [2, 3]. Para minimizar los problemas causados por los déficits neurológicos y reentrenar el cuerpo, se utiliza la rehabilitación neuropsicológica (NR), en la que los tratamientos individualizados ayudan a manejar problemas específicos con la memoria, la atención, la percepción, la resolución de problemas, el

razonamiento y las funciones ejecutivas, la iniciativa y el autocontrol.

Hace aproximadamente dos décadas, se empezaba a reconocer la validez de la utilización de realidad virtual (VR)² en diagnósticos y rehabilitación neurofisiológica [2] y en la actualidad existe una comunidad muy activa [4, 5, 6, 7]. Algunas de las aplicaciones que habían despertado interés en la comunidad científica estaban relacionadas a la evaluación y el tratamiento de fobias, trastornos obsesivo compulsivos, trastornos por estrés posttraumático y síndromes de déficit de atención hiperactivo. A priori es posible formular una serie de ventajas que puede tener la utilización de VR respecto de las prácticas más tradicionales, como ser: reproducir un entorno cotidiano realista donde realizar las interacciones; someter al paciente a estímulos controlados, seguros e intencionalmente diseñados; focalizar la atención multisensorial evitando distracciones del mundo real; definir jerarquías o niveles en los estímulos y repetirlos a voluntad; orientar los estímulos para colaborar con la rehabilitación psicológica; generar un feedback instantáneo al paciente; incluir interacciones lúdicas y auto-exploratorias que motiven al paciente; evitar la incomodidad del paciente al ser evaluado (observado); posibilitar la telemedicina [2, 8, 9]. Las limitaciones de hardware y de estándares de software son cada vez menos influyentes, y el acceso masivo y económico a plataformas de videojuegos comerciales ha permitido avanzar en estos tópicos [9]. Sin embargo, entran en consideración algunos tópicos que pueden ser evaluados respecto de las limitaciones: el grado de realismo y de naturalidad del entorno; la complejidad y la multimodalidad de los estímulos sensoriales; la dificultad de darle flexibilidad a las aplicaciones; y la inherente psicología del individuo que conducirá a interpretaciones e interacciones

²Consideramos aquí que VR se refiere a una interfaz humano-computadora que involucra simulaciones creíbles en tiempo real e interacciones multi-sensoriales (por ej. visuales, auditivas, hápticas, olfatorias, etc.).

¹En EEUU se producen alrededor de 795.000 ACVs por año [1].

particulares de los entornos y estímulos. Además, como destacan en [9], existe poca recolección de datos como para lograr la generalización de los resultados y validar la efectividad de los métodos basados en VR.

Respecto de las aplicaciones interactivas existen diferentes configuraciones que dependen del hardware y software utilizados. En [10] se presenta una revisión detallada de los sistemas de videojuegos comerciales y sistemas de rehabilitación, que no consideramos pertinente repetir aquí. Estas aplicaciones pueden tener características 2D ó 3D, pueden ser inmersivas o no-inmersivas [11], pueden realizar la ambientación por medio de sistemas ambientales o portables (*wearable devices*), pueden interactuar con el usuario mediante comandos/controles táctiles o con tecnologías no táctiles, etc. Además, es posible mencionar algunas características deseables que deberían tener éstas, con base en evidencia recolectada en estudios previos [11]. Por ejemplo: la presentación de la información cinemática más importante de forma simplificada permite una mejor interpretación por parte de los pacientes con ACV, la repetición y la intensidad mejoran la rehabilitación de las extremidades paréticas, la terapia de rehabilitación es más efectiva si se realiza durante un período de tiempo prolongado, mientras que las mejoras podrían perderse si una extremidad parética no se utiliza en toda su capacidad funcional una vez finalizada la rehabilitación formal.

Ramachandran y Rogers-Ramachandran [12] definen la terapia de espejo (TE) para ayudar a aliviar el dolor del "miembro fantasma", cuando todavía se siente dolor en el miembro después de ser amputado. Tradicionalmente, se utiliza una caja con un espejo para crear una ilusión reflectante de una extremidad que no existe a partir de la otra (ver Figura 1), y la hipótesis es que cada vez que el paciente intenta mover la extremidad paralizada, recibe retroalimentación sensorial (a través de la visión y la propiocepción). Esta técnica de neuro-rehabilitación permite remodelar los mecanismos corticales, mediante una retroalimentación positiva a la corteza motora de que se ha producido el movimiento de la extremidad afectada. Cuando es aplicada a pacientes con ACV, se coloca un espejo en el plano sagital medio del paciente, reflejando así los movimientos del lado no parético como si fuera el lado afectado. La ilusión visual mediante la cual se puede percibir que el movimiento o el tacto de la extremidad intacta afectan a la extremidad parética o dolorosa y tienen efecto en la activación de "neuronas espejo" [13]. Es este proceso el que se pretende realizar mediante el sistema que presentamos aquí, de modo que el movimiento de una mano saludable sea reproducido virtualmente en la mano

afectada, y así lograr una estimulación de neuroplasticidad para apoyar el proceso de rehabilitación de la mano afectada.

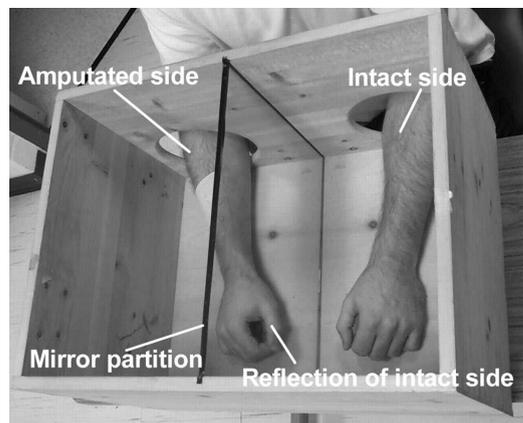


Figura 1. Caja de espejo (imagen tomada de <https://www.flickr.com/>)

También se proponen otras tareas que involucran una mayor movilidad y control, y también pueden utilizarse para rehabilitación de pacientes con otras patologías. Si bien existen algunas aplicaciones comerciales para la rehabilitación de manos [14, 15], este desarrollo pretende ser de código abierto para que cualquiera pueda acceder.

En este trabajo se presentan los avances en el desarrollo de un sistema que asistirá a terapeutas y/o kinesiólogos en el proceso de rehabilitación de manos/muñecas en pacientes con ACV. Se pretende lograr un sistema interactivo que mejore la experiencia de los pacientes a la hora de realizar los ejercicios de rehabilitación, y que además, podría ser usado en un entorno de telemedicina lo cual es muy útil para alcanzar a más pacientes, reducir los desplazamientos de muchos kilómetros y facilitar la tarea en épocas como la que atravesamos debido a la pandemia. Se considera muy importante lograr un sistema inmersivo, y si bien no se cuenta con esa implementación se han hecho avances en esa dirección.

A continuación se introduce la metodología y desarrollo del sistema, luego se presentan y discuten los resultados, y finalmente se exponen conclusiones de lo desarrollado y se mencionan los trabajos futuros.

2. Materiales y métodos

En esta sección se presenta el diseño y desarrollo del sistema, y cuales son las simplificaciones que se realizaron para lograr la versión actual. Se puede ver también que se realizó el procesamiento de video para la detección de las manos a través de técnicas tradicionales de procesamiento

digital de imágenes, ya que son factibles de optimizar y no requieren demasiado hardware. Estas consideraciones se orientan a que el sistema final debería funcionar en un teléfono celular estándar con Android o en un sistema embebido. Para esta etapa se definieron 3 ejercicios distintos ad-hoc a partir de la bibliografía, cada uno con un nivel de dificultad diferente, pensados para pacientes con más o menos movilidad. En una etapa posterior, éstos serán revisados por especialistas y serán ajustados según sus recomendaciones.

Para la implementación de la detección, segmentación y clasificación de gestos se utilizó Python [16] y OpenCV [17], mientras que para la simulación con realidad aumentada, se utilizó PyGame [18]³. El objetivo es que el sistema final funcione completamente en un dispositivo móvil montado en la cabeza del paciente para brindar una experiencia en realidad virtual. Sin embargo, aquí se han hecho simplificaciones que se mencionan a continuación.

a. Diseño y esquema general

El primer paso fue la definición de la escena de trabajo donde funcionará el sistema. El usuario debe estar sentado en una silla frente a una mesa o escritorio, que tendrá convenientemente un color diferente a la piel del usuario y será lo más uniforme posible. En principio se pide que el paciente tenga descubierta la mano y el brazo un poco más allá de la muñeca. Con esto se logra una segmentación óptima, mientras que en otro caso no lo será tanto. Luego de varias pruebas de iluminación, se definió como la mejor alternativa a una luz led no dedicada (en lo posible alejada de la escena y apuntando al techo para generar una iluminación ambiental). Con esto evitamos generar sombras intensas como se puede ver en la Figura 2.



Figura 2. Imagen con iluminación ambiente

En lo que respecta a los dispositivos, se utilizan un celular Motorola Moto G3 y una PC con monitor. El video se captura con el celular desde una posición fija (en un trípode y apuntando hacia abajo a las manos del usuario). El video es transmitido a la pc por medio de DroidCAM⁴, la aplicación captura este streaming y lo procesa para identificar manos y gestos, y finalmente, se genera la escena simulada de la interacción virtual (que actualmente se reproduce en el monitor). Un esquema de la escena descrita se presenta en la Figura 3.

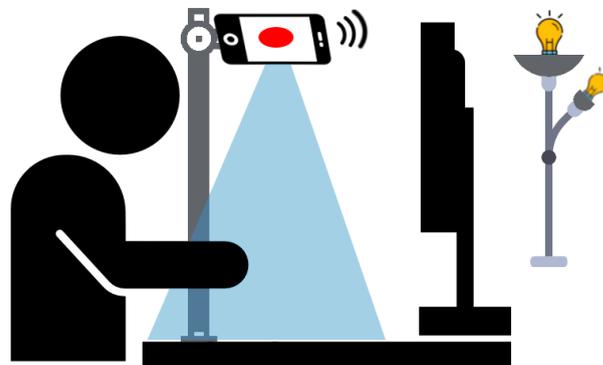


Figura 3. Organización de la escena

b. Captura y segmentación

Durante la configuración de la adquisición se evaluó la utilidad de la función de alto rango dinámico (HDR, del inglés *High Dynamic Range*) disponible en el celular. En las pruebas preliminares, con luz dedicada, se vieron intensificadas las sombras producidas con la mano, como se puede ver en las Figuras 4.a y 4.b. Entonces, se decidió evitar el uso de HDR para la implementación actual.



Figura 4. (a): HDR encendido. (b): HDR apagado.

Una vez obtenido el streaming, se procesa frame a frame. Para reducir el ruido en la imagen y lograr colores más uniformes en la mano, se aplicó un filtro gaussiano de tamaño (7x7)px y varianza alta; y luego, se utilizó un filtro de mediana de (11x11)px.

³ Disponibles en <https://www.python.org/>, <https://opencv.org/>, <https://pygame.org/>.

⁴ Disponible en <https://www.dev47apps.com/>

c. Generación y eliminación del fondo de escena

Para extraer las manos de la imagen sin el fondo, se procede a generar un modelo del fondo de la escena, que será sustraído de la imagen de entrada. Se probaron los métodos disponibles en OpenCV pero para esta aplicación no resultaron demasiado útiles, sobre todo no resulta necesaria la actualización permanente. Se utilizaron las implementaciones MOG2 y K-NN para la generación de fondo⁵, y como se actualizaban en cada frame se generaba un problema en las zonas donde se encuentran más frecuentemente las manos del usuario. Así, se generan colores combinados entre la piel y el fondo, como se puede observar en la Figura 5.

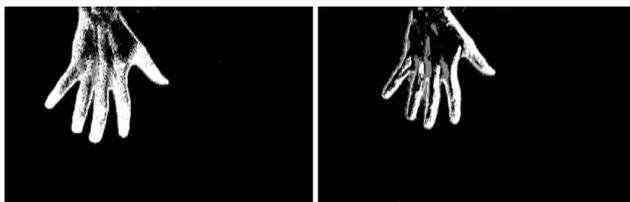


Figura 5. (a) Resultado con el método KNN, (b): Resultado con el método MOG2

Por lo tanto, se decidió utilizar un modelado simple a partir del promedio de imágenes de fondo (considerando de 1 a 2 segundos), y se comprobó que era útil para ajustar las condiciones del streaming de la cámara en los casos que existía “autoenfoco” y “autoexposición”. Si bien este proceso se realiza al comenzar la ejecución del sistema, se puede recalculer la imagen de fondo cuando el usuario lo desee y podría ajustarse para que se vuelva a calcular automáticamente a intervalos regulares de tiempo. Durante el cómputo del fondo, aparece en la vista de la cámara un círculo rojo, para informar al usuario que no debe colocar sus manos en la escena. Cuando ya se cuenta con el fondo, se toma la diferencia absoluta entre el frame actual y el fondo calculado previamente. El resultado es umbralizado para obtener una máscara binaria, como se puede observar en la Figura 6.

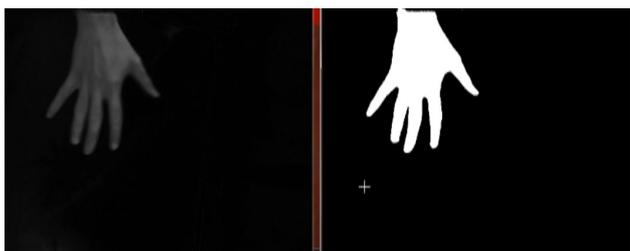


Figura 6. (a): Diferencia absoluta entre imagen y fondo, (b): Resultado umbralizado

Habitualmente, la máscara obtenida no es perfecta y necesita un post-proceso. Primero se aplica un proceso de apertura morfológica con un kernel de 3x3 para eliminar ruidos (objetos espúreos pequeños), seguido de cuatro iteraciones de un proceso de cierre morfológico para rellenar los agujeros que se producen en la zona de interés (Figura 5.a). Como eventualmente también se generan objetos espúreos más grandes, por medio de la aplicación del algoritmo de componentes conectadas, estos son eliminados, ya que a esta altura del proceso el objeto más grande es la parte que corresponde al cuerpo (Figura 5.b).

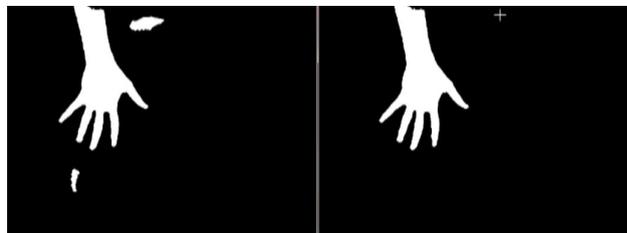


Figura 7. (a): máscara luego de operaciones morfológicas, (b): máscara final

El último paso de esta etapa es aplicar la máscara a la imagen original, y hacer que todo lo que pertenece al fondo se vuelva transparente. El resultado se puede observar en la Figura 8.



Figura 8. Imagen final e imagen de entrada

d. Identificación de gestos

Este módulo del sistema recibe como entrada los frames de video ya preprocesados y el objetivo es detectar los movimientos y posiciones de la mano; y el gesto que esté realizando en ese momento. Para el reconocimiento de los gestos se utilizó un enfoque geométrico y se utilizaron ideas propuestas en [19]. A partir de la imagen con la mano segmentada, se calcula la envolvente convexa que la contiene. Con esto se simplifica la estructura de la mano y es posible identificar puntos en la mano que son de utilidad a la hora de estimar un gesto. De la envolvente convexa, se obtienen los “vértices”, los “defectos” y el centro de masa. En la Figura 9 se presentan los gestos que se utilizan en este trabajo: mano abierta, puño cerrado y

⁵ Documentación disponible en https://docs.opencv.org/3.4/d1/dc5/tutorial_background_subtracti.html

símbolo de paz. La incorporación de nuevos gestos es una tarea sencilla.

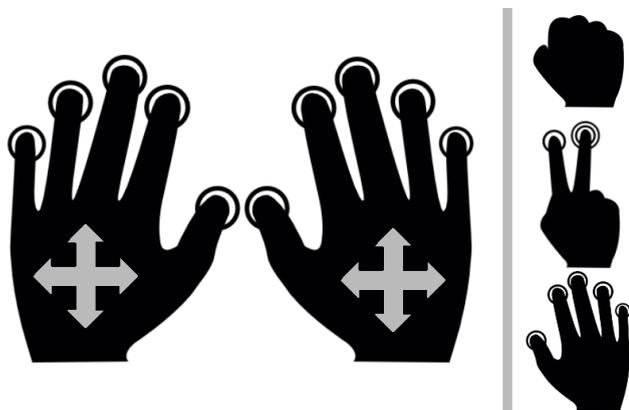


Figura 9. Gestos identificables

Para el caso de la **palma abierta** (ver Figura 10), los vértices de la envoltura convexa coinciden con las puntas de los dedos (puntos color magenta), mientras que los valles entre dedos quedan determinados por los defectos convexos, que son los puntos de máxima distancia desde la envoltura convexa a la superficie que ésta encierra entre vértices (puntos color cyan). La muñeca también presenta un valle (punto color amarillo), pero es simple de determinar por el tamaño del ángulo que forma con los vértices adyacentes. Los defectos convexos espurios (punto color azul) pueden filtrarse con un umbral de distancia mínima. Finalmente, se calcula el centro de la palma (punto color azul) como el punto medio de los puntos de valles y de muñeca, mientras que, una elipse que pasa por estos puntos aproxima los límites de la palma.

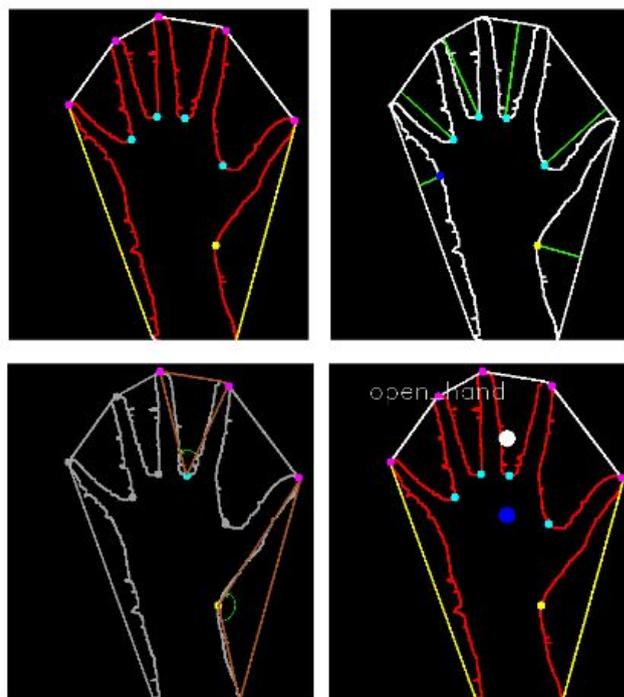


Figura 10. Cálculo de características de la mano abierta

Para el caso del gesto de **puño cerrado**, que no presenta dedos ni valles, se hace necesario computar de otra manera el centro de la palma. El centro de masa del envoltorio no es una buena aproximación, debido a la posible presencia de diferentes “cantidades de brazo” en la imagen. Una alternativa es tratar de identificar qué parte se corresponde con la mano. Entonces, se utilizan los dos “lados” más largos de la envoltura convexa para determinar el brazo (representados con las líneas amarillas en la Figura 11). Finalmente se aproxima el centro del puño con el resto de los lados.

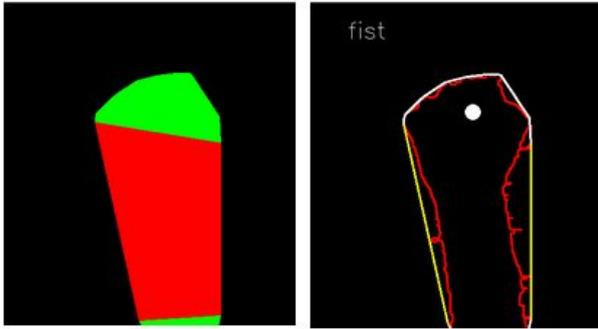
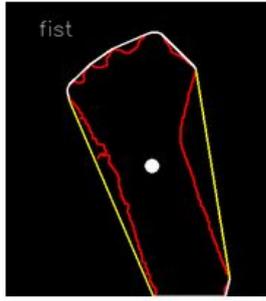


Figura 11. Cálculo de características para el puño

Como hemos restringido los símbolos válidos, resta definir el caso del “**símbolo de paz**” y para esto se hace la detección de dos dedos y un valle.

Para agregar nuevos gestos, es preciso observar los patrones de aparición de cada tipo de punto, especificarlos y proceder con la clasificación.

e. Simulación y ejercicios

Los resultados obtenidos en las etapas previas, permiten definir diferentes ejercicios, que pueden involucrar el movimiento de la mano y/o la realización de gestos. Si bien, aquí sólo definimos 3, agregar nuevos ejercicios utilizando los resultados previos es bastante simple. Para esta etapa se decidió utilizar la biblioteca PyGame por la facilidad de integración con el resto de la aplicación y porque cuenta con las funcionalidades mínimas requeridas para la versión actual. En la siguiente sección se retoma la discusión acerca de la forma de simular el ejercicio.

En aquellos casos donde se pretende realizar una estimulación basada en la metodología de espejo, un primer paso es crear un área de visualización del doble de ancho de la imagen de entrada para poder mostrar la mano que realiza el ejercicio y su versión espejada. Es necesario definir qué mano es la parética y así, se logra presentar la ilusión de que ambas manos están trabajando.

Sobre esta ventana de visualización, se presentan distintos *sprites* (imágenes) que el usuario debe alcanzar

con la mano y si debe realizar un gesto, siguiendo las reglas del ejercicio escogido. A continuación, se explican los ejercicios propuestos sobre la imagen de entrada.

Ejercicio 1: movimiento coordinado simple

Este ejercicio se pensó para pacientes con movilidad reducida en la mano y los dedos. Su objetivo es entrenar la movilidad de la mano completa, sin contemplar la realización de gestos.

En este ejercicio existe una zona de reposo de la mano, donde inicia y finaliza cada interacción (representada con el rectángulo celeste en la Figura 12). Durante el ejercicio aparece en la pantalla y con ubicación aleatoria un círculo blanco (Fig. 13) que debe ser alcanzado moviendo con la mano. Cuando el círculo es alcanzado, este se torna de color verde (Fig. 14), confirmando que el objetivo fue cumplido. Luego de unos segundos, el círculo desaparece y el rectángulo celeste indica que debe volver a la posición de reposo. Este proceso se repite las veces que se defina.

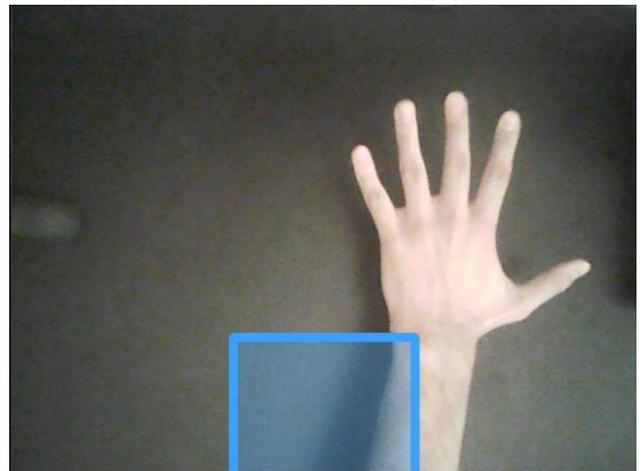


Figura 12. Zona de reposo (recuadro celeste)

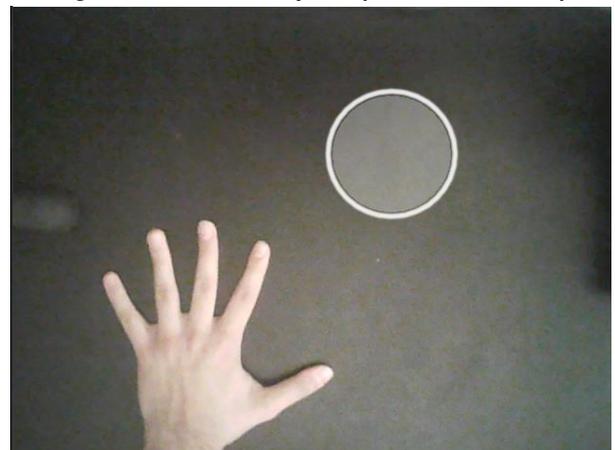


Figura 13. Objetivo que debe alcanzarse



Figura 14. Objetivo alcanzado con éxito



Figura 16. Localización correcta y gesto erróneo

Ejercicio 2: movimiento y realización de gestos

Este ejercicio está orientado a pacientes con mayor movilidad en los dedos y muñeca, ya que se requiere la realización de distintos gestos con las manos. Este ejercicio tiene una dinámica similar a la del ejercicio 1, se deben alcanzar los círculos desde la posición de reposo y una vez cumplido el objetivo, se retorna a la posición de reposo. La diferencia aquí es que, una vez alcanzado el círculo, el paciente debe realizar el gesto que se le indica dentro del círculo y mantenerlo durante unos segundos (Fig. 15). Cuando ambas condiciones se cumplen de forma simultánea (Figs. 16 y 17), el círculo cambia a color verde para indicar el éxito de la acción, y luego, se indica que debe retornar a la zona de reposo. Esto se puede repetir las veces que sea necesario, y cada vez, tanto la localización como el gesto son escogidos de forma aleatoria.



Figura 17. Localización y gesto correctos

Ejercicio 3: interacción con objetos

Este ejercicio requiere una buena movilidad en los dedos y mano, además de coordinación. El paciente debe tener la capacidad de mover las manos; abrir y cerrar su puño para poder tomar objetos y desplazarlos (Fig. 18 y 19). En este ejercicio, la dinámica consiste en alcanzar la posición de la pelota virtual (que aparece dibujada en pantalla) y realizando el gesto del **puño** se “captura” la pelota. Se debe mantener el gesto del **puño** mientras se desplaza la mano hasta la posición indicada, y finalmente se abre la mano para liberar la pelota. Si el ejercicio se realizó correctamente el círculo se vuelve de color verde y se indica que debe retornar a la zona de reposo (Fig. 20). El proceso puede ser repetido las veces que sea requerido, y asigna posiciones aleatorias a la pelota y a la posición de destino en cada realización.



Figura 15. Localización y gesto objetivo

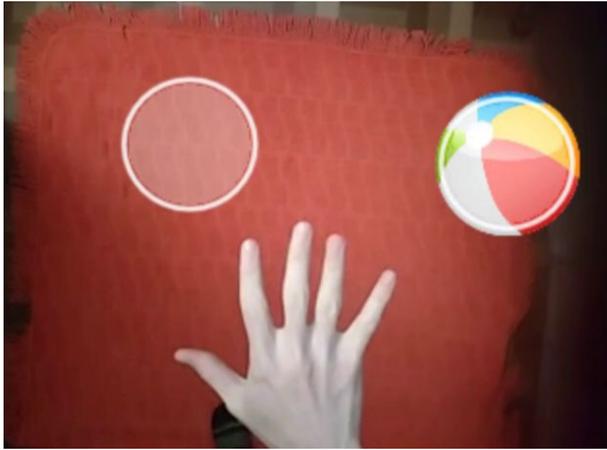


Figura 18. Pelota y destino objetivo



Figura 20. Objetivo alcanzado con éxito

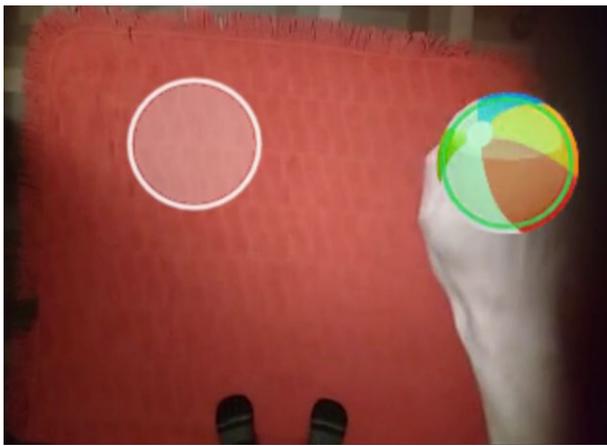


Figura 19. Mano capturando la pelota

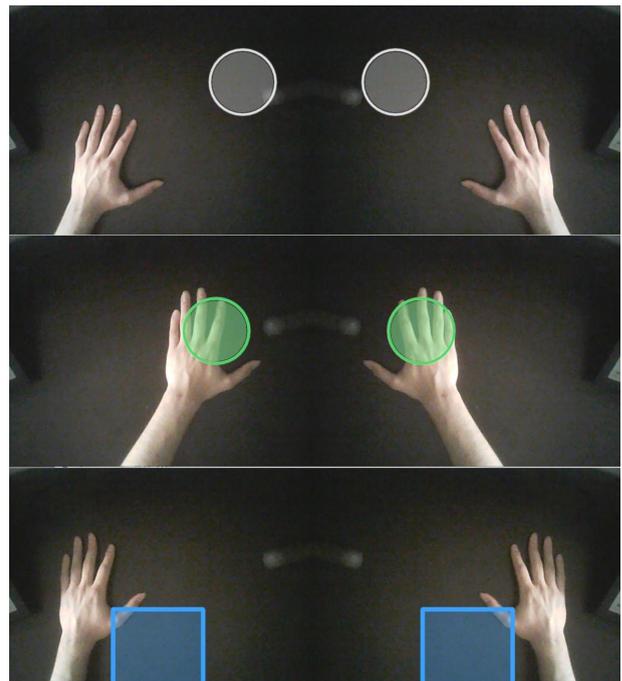


Figura 21. Capturas de pantalla, ejercicio 1

3. Resultados y discusiones

Aquí se presentan los resultados de la visualización que recibe el paciente y se proponen discusiones y consideraciones que permitirán enriquecer y mejorar el sistema. En las Figuras 21 y 22 se pueden ver ejemplos de las pantallas que se visualizan durante la realización de los ejercicios implementando la metodología de espejo. Como se comentó previamente, en la versión actual la salida es presentada a través del monitor.

Para que se pueda observar el funcionamiento del sistema, ponemos a disposición dos videos en <https://www.youtube.com/watch?v=GaMWOlxoU2Y> y <https://www.youtube.com/watch?v=728MbKEqxKg>. En el primero se ve la salida que obtiene el paciente mientras realiza un ejercicio, mientras que en el restante se intenta mostrar toda la escena donde transcurre la actividad.

Se pretende avanzar con la proyección de estas imágenes a través de un celular emplazado en un dispositivo de VR. En este sentido, se están evaluando diferentes posibilidades respecto de la generación de la imagen estéreo: (1) realizar el efecto de distorsión radial y de centrado de imágenes desde cero, y enviar esa imagen estéreo al celular, (2) enviar la imagen que se ve en las

capturas y utilizar un API de Android para la generación de la imagen estéreo y su reproducción.

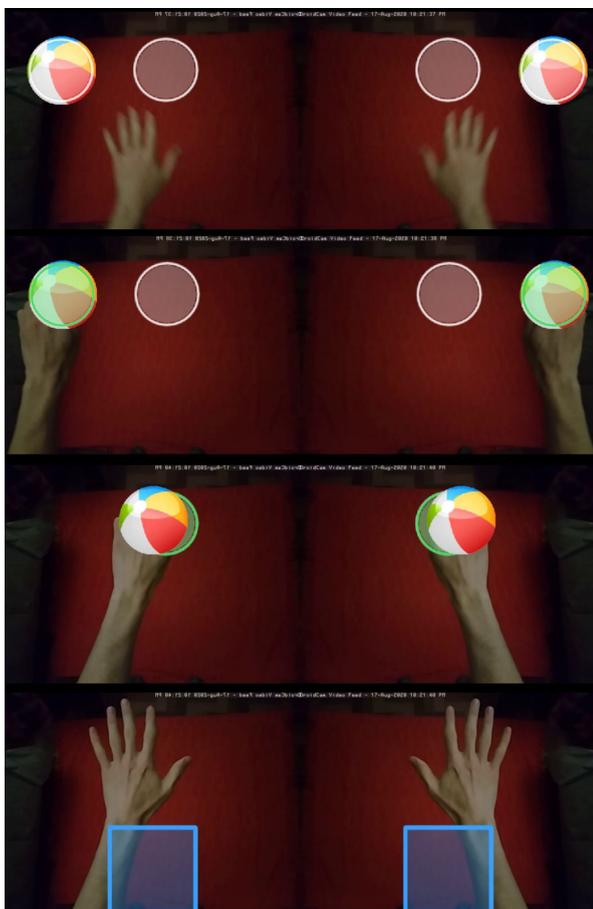


Figura 22. Capturas de pantalla, ejercicio 3

Respecto de la forma de hacer el streaming al celular: (1) utilizar alguna aplicación como VLC⁶ para reproducir el streaming en el celular, (2) generar un streaming en vivo en YouTube. Esta última opción tendría dos ventajas, es posible generar el vídeo estéreo utilizando una opción de la aplicación y además, se puede compartir el link de la transmisión por internet para que un especialista observe en vivo lo que observa el paciente.

Otro tema que puede abrirse a la discusión es el hecho de utilizar las imágenes de las manos reales en vez de simular la escena completamente. Si bien se analizó la segunda propuesta, nos pareció que la percepción de la mano propia es muy relevante, más allá de que la integración de escenarios y objetos sintéticos o simulados con información real puede no verse tan agradable.

Es importante que un próximo paso sea la interacción con especialistas en rehabilitación neurofisiológica, tanto para validar la utilidad del sistema como para incorporar

nuevas tareas, como ser: la estimulación/rehabilitación de otro tipo de pacientes, la realización de ejercicios a dos manos combinadas, incorporación de actividades cognitivas y de memoria como ser la realización de gestos en secuencia o recordar una secuencia de destinos donde mover un objeto, entre otros.

4. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema que permite la realización virtual de ejercicios cuya metodología está basada en la terapia de espejo. La implementación se realizó utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes con lo que se logran resultados muy satisfactorios manteniendo una baja complejidad respecto de los algoritmos y la carga computacional. Se han cumplido los objetivos respecto a la reproducción de algunos ejercicios de la terapia y a la detección de posicionamiento de la mano y sus gestos. El sistema actual está en condiciones de ser puesto en funcionamiento sin mayores dificultades de instalación y uso, por parte de los terapeutas para poder generar mejores experiencias en estas terapias de rehabilitación.

Los trabajos futuros a corto plazo incluyen la incorporación de gestos adicionales y la definición de nuevos ejercicios con el asesoramiento de especialistas. Mientras que, en el mediano plazo, se pretende realizar la implementación necesaria para la visualización mediante un celular montado en un dispositivo de VR, y las evaluaciones en pacientes reales que validen su utilidad. En el largo plazo, se pretende utilizar mini-pc (como ser Raspberry Pi) para reemplazar la pc y se evaluará la implementación completa a través de Android sobre un único dispositivo celular.

Referencias

- [1] Go AS, Mozaffarian D, Roger VL, Benjamin EJ, Berry JD, Bhatt DL, Dai S, Ford ES, Fox CS, Franco S. Heart disease and stroke statistics - 2014 update: a report from the American Heart Association. *Circulation* 2014;129:e28–e292.
- [2] Khan, Yasir, Zhijie Xu, and Mark Stigant. "Virtual reality for Neuropsychological diagnosis and rehabilitation: A Survey." *Proceedings on Seventh International Conference on Information Visualization, 2003. IV 2003.. IEEE, 2003.*
- [3] Ownsworth, Tamara, et al. "Assessing emotional status following acquired brain injury: The clinical potential of the depression, anxiety and stress scales." *Brain Injury* 22.11 (2008): 858-869.
- [4] Sevgi Ikbali Afsar, Ilkin Mirzayev, Oya Umit Yemisci, Sacide Nur Cosar Saracgil. *Virtual Reality in Upper*

⁶ Disponible en <https://www.videolan.org/>

Extremity Rehabilitation of Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 27(12): 3473-3478, 2018.

- [5] Maggio, Maria Grazia; Latella, Desirèe; Maresca, Giuseppa; Sciarrone, Francesca; Manuli, Alfredo; Naro, Antonino; De Luca, Rosaria; Calabrò, Rocco Salvatore Virtual Reality and Cognitive Rehabilitation in People With Stroke: An Overview, *Journal of Neuroscience Nursing*, 51(2): 101-105, 2019.
- [6] Ayhan Aşkın and Emel Atar and Hikmet Koçyiğit and Aliye Tosun. Effects of Kinect-based virtual reality game training on upper extremity motor recovery in chronic stroke. *Somatosensory & Motor Research*, 35(1): 25-32, 2018. Taylor & Francis.
- [7] Vourvopoulos, A., Pardo, O.M., Lefebvre, S., Neureither, M., Saldana, D., Jahng, E., & Liew, S. (2019). Effects of a Brain-Computer Interface With Virtual Reality (VR) Neurofeedback: A Pilot Study in Chronic Stroke Patients. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13.
- [8] Estepa, A., et al. "Development of a Kinect-based exergaming system for motor rehabilitation in neurological disorders." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 705. No. 1. 2016.
- [9] Aulizio, M. C., Han, D. Y., & Glueck, A. C. (2020). Virtual reality gaming as a neurorehabilitation tool for brain injuries in adults: A systematic review. *Brain injury*, 34(10), 1322–1330. <https://doi.org/10.1080/02699052.2020.1802779>
- [10] Yates, Michael, Arpad Kelemen, and Cecilia Sik Lanyi. "Virtual reality gaming in the rehabilitation of the upper extremities post-stroke." *Brain injury* 30.7 (2016): 855-863.
- [11] Arip, Eza Surya Mohd and Ismail, Waidah and Nordin, Md Jan and Radman, Abduljalil. Virtual reality rehabilitation for stroke patients: Recent review and research issues. *AIP Conference Proceedings*, 1905(1):050007, 2017. <https://doi.org/10.1063/1.5012226>,
- [12] Ramachandran, V. S., and D. Rogers-Ramachandran. "Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors." *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 263.1369 (1996): 377-386.
- [13] Najiha Aishath, Alagesan Jagatheesan, Rathod, Vandana and Paranthaman Poongundran, "MIRROR THERAPY: A REVIEW OF EVIDENCES.", *International Journal of Physiotherapy and Research*. 3. 1086-90. 2015
- [14] EvolvRehab, "Virtual Rehab Hands", https://evolvrehab.com/virtualrehab/virtualrehab_hands/.
- [15] Rewellio, "Virtual Reality (VR) based hand rehabilitation for stroke patients", <https://www.youtube.com/watch?v=EgGqS2zKpv8>.
- [16] Minichino, Joe, and Joseph Howse. *Learning OpenCV 3 Computer Vision with Python*. Packt Publishing Ltd, 2015.
- [17] Laganière, Robert. *OpenCV 3 Computer Vision Application Programming Cookbook*. Packt Publishing Ltd, 2017.
- [18] Kelly, Sloan. *Python, PyGame and Raspberry Pi Game Development*. Apress, 2016.
- [19] Byung-Gook Lee Hui-Shyong Yeo and Hyotaek Lim, "Hand tracking and gesture recognition system for human-computer interaction using low-cost hardware", *Multimed Tools Appl*, 74, 31, 2013.