

Interfaz virtual gamificada para evaluar estabilidad y precisión en la trayectoria del miembro superior

Mayoral, A.^a, Quiles, V.^{b,c}, Casanova, A.^d, Ortiz, M.^{b,c}, Azorín, J.M.^{b,c,e}, Jara, C.^d,
Angulo-Sherman, I.N.^a, Ubeda, A.^d, Iáñez, E.^{b,c,*}

^aDepartamento de Ingeniería Biomédica, Vicerrectoría de Ciencias de la Salud, Universidad de Monterrey, San Pedro Garza García, Nuevo León, México
(alejandro.mayoral@udem.edu, irma.angulo@udem.edu)

^bBrain-Machine Interface Systems Lab, Miguel Hernández University of Elche, Elche, Spain (vquiles@umh.es, mortiz@umh.es, jm.azorin@umh.es,
eianez@umh.es)

^cEngineering Research Institute of Elche (I3E), Miguel Hernández University of Elche, Elche, Spain

^dHuman Robotics Group, University of Alicante, 03690 San Vicente del Raspeig, Spain (anahis.casanova@ua.es, carlos.jara@ua.es, andres.ubeda@ua.es)

^eValencian Graduated School and Research Network of Artificial Intelligence—ValGRAI, Valencia, Spain

Resumen

En este artículo se presenta una interfaz gamificada de rehabilitación del miembro superior desarrollada en Unity e integrada con el robot ArmMotus M2 Pro (Fourier). El juego consiste en controlar una nave espacial para seguir una trayectoria ideal, recolectar un suministro y regresar a una base evitando colisiones. Cuenta con cinco niveles de dificultad y dos modos de uso: historia y libre. Se han implementado métricas de desempeño: precisión, cuantificada como la distancia promedio entre la trayectoria ideal y la trayectoria real, y estabilidad, estimada en tiempo real mediante el cociente entre la velocidad tangencial máxima y la velocidad promedio, y mediante la longitud del arco espectral (SPARC) del perfil de velocidad. Una validación preliminar con dos participantes sanos bajo dos condiciones de resistencia aplicada por el robot (1 N y 5 N) mostró que las métricas son sensibles a cambios de dificultad y resistencia, sugieren el potencial del sistema para evaluación motora cuantitativa en entornos de rehabilitación.

Palabras clave: Gamificación, rehabilitación, evaluación cinemática, robótica

Gamified virtual interface for assessing stability and trajectory accuracy of the upper limb

Abstract

A gamified upper-limb rehabilitation interface developed in Unity and integrated with the ArmMotus M2 Pro (Fourier) robot is presented in this article. The game consists of controlling a spacecraft to follow an ideal trajectory, collect a supply item, and return to a base while avoiding collisions. It includes five difficulty levels and two usage modes: story and free play. Performance metrics have been implemented: accuracy, quantified as the mean distance between the ideal and executed trajectories, and stability, estimated in real time as the ratio of maximum tangential velocity to mean tangential velocity, and via the spectral arc length (SPARC) of the velocity profile. A preliminary validation with two healthy participants under two robot-applied resistance conditions (1 N and 5 N) suggests that the metrics are sensitive to changes in difficulty and resistance, supporting the feasibility of the system for quantitative motor assessment in rehabilitation settings.

Keywords: Gamification, rehabilitation, kinematic evaluation, robotics

1. Introducción

Las disfunciones motoras del miembro superior son una de las secuelas de mayor prevalencia tras eventos neurológicos como accidentes cerebrovasculares (ACV), lesiones medulares,

traumatismos craneoencefálicos y enfermedades neurodegenerativas. Estas alteraciones pueden comprometer la funcionalidad del brazo y la mano, impactando en la autonomía y calidad de vida (Mukherjee et al., 2020). En particular, el ACV es una causa principal de discapacidad y suele producir hemiparesia

*Autor para correspondencia: eianez@umh.es

o hemiplejía y, en muchos casos, espasticidad (Smith, 2024). La rehabilitación busca promover la neuroplasticidad mediante práctica intensa, repetida y específica de tareas motoras (Fluet et al., 2017). Sin embargo, la rehabilitación convencional puede ser repetitiva y poco motivadora, además de depender de recursos humanos limitados y tener dificultades para medir objetivamente el progreso (Guan, 2013).

Ante estas limitaciones, los sistemas robóticos han surgido como una alternativa al permitir ajustar el nivel de asistencia o resistencia, reducir la carga física para el terapeuta y registrar métricas cuantitativas del desempeño motor (Kyrkjebø et al., 2018). Sin embargo, estos beneficios no garantizan el éxito terapéutico, ya que sostener la adherencia del paciente sigue siendo un reto, por ello, se han incorporado interfaces gráficas gamificadas para incrementar la motivación mediante objetivos claros, retroalimentación visual atractiva y el uso de indicadores de la progresión de dificultad, además de facilitar el registro del desempeño (Loreto et al., 2012). En este sentido, el diseño del juego debe incorporar tareas que coadyuven al entrenamiento motor sustentadas en la literatura y, a la vez, apoyarse en una interfaz que mantenga al paciente motivado y resalte la relevancia funcional de dichas tareas en la vida diaria, con el objetivo de que la práctica dentro del juego se traduzca en mejoras motoras.

que la dificultad se regula principalmente aumentando el número de objetivos o la complejidad del movimiento requerido.

Con base en estos criterios, en este trabajo se desarrolla una interfaz gráfica gamificada integrada con la plataforma robótica ArmMotus M2 Pro (Fourier), diseñado para entrenar el miembro superior a través de tareas de seguimiento de trayectorias, con adaptación a distintos niveles de dificultad. En el juego, el usuario controla una nave y la guía a lo largo de una trayectoria previamente definida hasta llegar a un planeta destino y, posteriormente, de regreso a la base espacial de origen transportando suministros. Esta dinámica retoma la lógica terapéutica de los juegos de transporte y recolección, mientras que el desplazamiento sobre la ruta marcada se apoya en tareas de seguimiento de trayectorias predefinidas. De este modo, se mantiene el fundamento de entrenamiento motor descrito en trabajos previos, pero dentro de una narrativa que busca hacer la práctica más amena y, por ende, sostener la motivación durante la sesión. Adicionalmente, el sistema permite registrar métricas de precisión y estabilidad del movimiento, contribuyendo a una evaluación objetiva del proceso de rehabilitación.

2. Material y Métodos

2.1. Plataforma Robótica

Para la interacción entre la interfaz gráfica gamificada y el usuario, se utilizó la plataforma de rehabilitación para miembro superior ArmMotus M2 Pro (Fourier) (Figura 1). El dispositivo permite la ejecución de movimientos bidimensionales (x,y) del miembro superior y la adquisición de información cinemática del movimiento, como la posición del efector final, la cual es utilizada para la evaluación del desempeño motor durante la tarea. Adicionalmente, el robot puede configurarse para ejercer distintos grados de resistencia, incrementando la dificultad del movimiento.

La comunicación entre el robot y el ordenador se realizó a través de CAN (Controller Area Network), mientras que el intercambio de datos entre el ordenador y Unity se implementó mediante un esquema TCP. En particular, se desarrolló un script en Python encargado de recibir y procesar los datos de posición del robot. Desde Unity, un cliente TCP solicita al script de python la posición actual x,y del robot a una frecuencia de 20 Hz, y con esta información se actualizó en tiempo real la posición del elemento controlado dentro del juego.



Figura 1: Usuario utilizando el robot ArmMotus M2 Pro (Fourier) junto con el juego diseñado.

2.2. Interfaz Gráfica Gamificada en Unity

Se desarrolló una interfaz gráfica gamificada en la plataforma Unity, orientada a la rehabilitación del miembro superior mediante tareas de seguimiento de trayectorias. El sistema presenta trayectorias bidimensionales para que el usuario las siga visualmente en pantalla con el brazo conectado al robot (Figura 1).

Se desarrolló un juego con temática espacial que integrara características de los distintos juegos revisados en la literatura (Rodríguez-de Pablo et al. (2016); Gutiérrez et al. (2020)). En este juego, el usuario controla una nave y la guía a lo largo de una trayectoria previamente definida hasta llegar a un planeta destino. Al llegar a este planeta, la nave recoge un suministro que debe ser llevado de regreso a la base espacial de origen. La dinámica de ir a recoger un suministro y regresar a la base retoma los principios de los juegos de transporte de objetos y recolección de Rodríguez-de Pablo et al. (2016), mientras que el seguimiento de la trayectoria marcada se basa en las tareas de dibujo o seguimiento de formas sobre trayectorias predefinidas que se exponen en el artículo de Gutiérrez et al. (2020).

En cada nivel, el usuario debe transportar una cantidad determinada de suministros sin chocar con los obstáculos presentes en el escenario (ver figura 2). Estos obstáculos se encuentran fuera de la trayectoria marcada, por lo tanto, si el usuario sigue adecuadamente la trayectoria, no debería colisionar con ellos. Cada vez que la nave choca con un obstáculo, el usuario pierde una vida. Cuando se agotan todas las vidas, el nivel termina y se considera no superado. En total, se cuenta con 3 vidas de forma predeterminada, sin embargo, es posible modificar el número de vidas según las necesidades del usuario.

2.2.1. Menús

Se diseñó un menú inicial donde puede ingresarse información básica necesaria para el registro y análisis de los resultados. Esta información incluye: identificador del sujeto, nivel de dificultad y lugar de guardado de datos. Esto permitirá etiquetar los datos que se irán registrando en cada juego (Figura 2(a)).

Adicionalmente, se incluye en el menú una sección donde se muestran instrucciones acerca del uso del juego. Estas instrucciones son complementadas con ejemplos animados de cómo se debe seguir la trayectoria en pantalla, ya que se ha comprobado que las instrucciones animadas suelen mejorar la comprensión del usuario (Whittinghill and Herring, 2017).

2.2.2. Niveles

El juego está compuesto por cinco niveles, diseñados con una progresión gradual en la complejidad motriz requerida:

- Nivel 1 (Figura 2(b)): El paciente debe seguir una trayectoria curva. Este nivel está diseñado para que el usuario se familiarice con el entorno y comience a desarrollar control del movimiento. Se eligió iniciar con una trayectoria curva que puede ejecutarse principalmente mediante un movimiento de flexión y extensión del codo, lo que la hace más simple que una trayectoria recta, la cual suele implicar una mayor participación coordinada de otras articulaciones y grupos musculares (Hasan and Karst, 1989). En la Figura 2(b), se puede observar que la trayectoria puesta en el juego es bastante amplia. Por ello, se agregó una línea delgada blanca indicando la trayectoria ideal.
- Nivel 2 (Figura 2(c)): El usuario debe seguir una trayectoria recta. El objetivo de este nivel es aumentar ligeramente la complejidad de la tarea, fomentando una mayor coordinación y control motor fino.
- Nivel 3 (Figura 2(d)): El paciente debe seguir una trayectoria curva que incluye un tramo recto. En este nivel se espera que el usuario combine las habilidades practicadas en los niveles 1 y 2, enfrentándose a una demanda motriz mayor al alternar entre secciones curvas y rectas.
- Nivel 4 (Figura 2(e)): El paciente debe seguir una trayectoria en forma de zigzag. Este nivel requiere que el usuario realice más cambios de dirección en comparación con los niveles anteriores, lo que implica un control motor más preciso.
- Nivel 5 (Figura 2(f)): El paciente debe seguir una trayectoria irregular. Este nivel está pensado para evaluar la capacidad del usuario de mantener la precisión y la estabilidad del movimiento en condiciones que exigen un control motor más avanzado. Se ha observado en distintos programas de rehabilitación que incrementar progresivamente la dificultad de las tareas favorece la mejora de las habilidades motoras (Marchal-Crespo and Reinkensmeyer, 2009).

Cabe mencionar que cada nivel puede configurarse en modo espejo, invirtiendo la trayectoria, para adaptarlo a la rehabilitación del brazo derecho o del izquierdo.

El juego cuenta con dos modos principales: modo libre y modo historia.

- Modo libre: puede seleccionarse uno de los niveles disponibles y ajustar la cantidad de repeticiones y vidas disponibles.
- Modo historia: el usuario progresa a través de una secuencia de niveles predeterminada.

Adicionalmente, se incluye una opción de personalización del modo historia que permite seleccionar el orden de los niveles por los que pasará el usuario, definir el número de suministros que debe transportar y ajustar la cantidad de vidas disponibles. Esto tiene como objetivo adaptar la dificultad del juego a las necesidades y capacidades de cada usuario, facilitando una terapia más personalizada.

Antes de iniciar cada sesión de juego se solicita al usuario que coloque el cursor controlado por el robot sobre la nave y lo mantenga ahí durante 3 segundos. El objetivo de esto es que el usuario comience siempre desde la posición inicial adecuada.

2.2.3. Calibración

Se incorporó una opción de calibración del espacio de trabajo para personalizar el rango de movimiento del usuario y adecuar la interacción a sus capacidades motoras. Durante este procedimiento, el juego solicita al usuario trazar un rectángulo y al alcanzar cada esquina, confirmar mediante un botón para que el sistema registre las coordenadas durante 3 s. Para cada esquina se calcula el promedio de las muestras registradas y a partir de estos cuatro puntos se obtienen los límites del espacio de trabajo (x_{min} , x_{max} , y_{min} , y_{max}). Dichos límites se utilizan posteriormente para escalar y mapear las coordenadas del robot al sistema de referencia del juego.

2.3. Métricas y gamificación

Durante la ejecución de los diferentes niveles, el juego calcula las siguientes variables en tiempo real:

- Precisión: medido como la distancia promedio entre la trayectoria ideal (la que el juego le pide seguir al usuario) y la trayectoria que realmente hizo el participante. Esto refleja la cercanía con la que el usuario pudo seguir la trayectoria propuesta por el juego. Valores bajos indican mayor precisión y control sobre el movimiento. Esto se mide con la siguiente fórmula (Colombo et al., 2005):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n} \quad (1)$$

Donde:

n=número total de muestras

d_i =distancia del punto i-ésimo respecto al recorrido ideal

i=índice de la muestra, que va desde 1 hasta n

- Estabilidad: La estabilidad se midió mediante dos enfoques. El primer método, utilizado para retroalimentación en tiempo real, se basó en el cociente entre la velocidad tangencial promedio y la velocidad tangencial máxima, definido como:

$$S_{MP} = \frac{\bar{v}}{v_{m\acute{a}x}}. \quad (2)$$

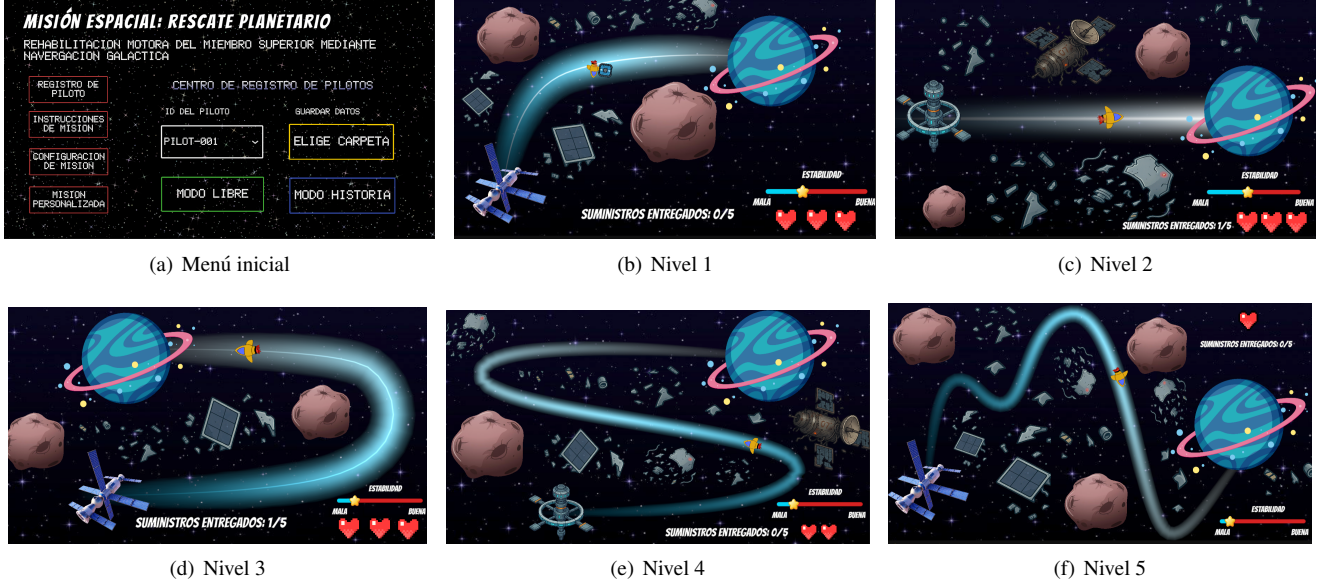


Figura 2: Niveles y menú inicial utilizados en el juego.

Dada la trayectoria $\mathbf{p}(t) = [x(t), y(t)]$, la velocidad tangencial continua se define como:

$$v(t) = \|\dot{\mathbf{p}}(t)\| = \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2}. \quad (3)$$

Para implementarlo de forma discreta, a partir de muestras $\mathbf{p}[n] = [x[n], y[n]]$ adquiridas en tiempos $t[n]$ (con $n = 0, \dots, N-1$), la velocidad entre muestras consecutivas se estimó como:

$$v[n] = \frac{\|\mathbf{p}[n] - \mathbf{p}[n-1]\|}{t[n] - t[n-1]}, \quad n = 1, \dots, N-1. \quad (4)$$

Con ello, la velocidad promedio y la velocidad máxima se calcularon como:

$$\bar{v} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} v[n], \quad v_{\max} = \max_{n \in \{1, \dots, N-1\}} v[n]. \quad (5)$$

Debido a que $\bar{v} \leq v_{\max}$, el índice S_{MP} toma valores entre $[0, 1]$, donde valores cercanos a 1 indican un perfil de velocidad más uniforme (mayor estabilidad) y valores cercanos a 0 reflejan picos de velocidad más pronunciados (menor estabilidad) (Colombo, 2018).

Para incrementar la sensibilidad del indicador a cambios recientes durante la ejecución, S_{MP} se calculó en una ventana deslizante de 3 s y se mostró al usuario mediante una barra para brindar retroalimentación visual (Figura 2).

La segunda forma en la que se calculó la estabilidad es mediante una métrica basada en la Longitud de Arco Espectral del perfil de velocidad (SPARC). El SPARC evalúa las pequeñas oscilaciones en el perfil de velocidad de la trayectoria que corresponden a frecuencias más altas que el movimiento subyacente. Esta métrica es más compleja, pero ha demostrado ser robusta y útil (Colombo, 2018). Por ello, se calcula al final de cada nivel para dar una perspectiva general de la estabilidad del movimiento.

El algoritmo utilizado para calcular esta métrica está basado en el artículo de Balasubramanian et al. (2015). Los pasos para calcularla son los siguientes:

1. **Segmentación.** Seleccionar el segmento del registro de velocidad que corresponde al movimiento:

$$\{v[n]\}_{n=0}^{N-1}. \quad (6)$$

2. **Espectro de magnitud (FFT con zero-padding).** Rellenar con ceros la señal hasta longitud K y calcular:

$$V[k] = \left| \text{FFT}(v_{zp}[n]) \right|, \quad k = 0, \dots, K-1, \quad (7)$$

donde

$$v_{zp}[n] = \begin{cases} v[n], & 0 \leq n \leq N-1, \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (8)$$

Balasubramanian et al. (2015) sugiere elegir:

$$K = 2^{\text{roundup}(\log_2 N) + 4}. \quad (9)$$

3. **Normalización respecto a DC.**

$$\hat{V}[k] = \frac{V[k]}{V[0]}. \quad (10)$$

4. **Selección del índice de corte.** El índice de corte K_c se determina usando el umbral V_{th} y se acotó por K_c^{\max} :

$$K_c = \min \left\{ K_c^{\max}, \min \left\{ K : \hat{V}[r] < V_{th} \forall r > K \right\} \right\}. \quad (11)$$

Se eligieron los valores de $V_{th} = 0,05$ y $K_c^{\max} = 20\pi$, ya que son los valores recomendados en el artículo de Balasubramanian et al. (2015).

5. **Cálculo de SPARC.**

$$\text{SPARC} \approx - \sum_{k=1}^{K_c-1} \sqrt{\left(\frac{1}{K_c-1} \right)^2 + (\Delta \hat{V}[k])^2}. \quad (12)$$

$$\Delta \hat{V}[k] = \hat{V}[k] - \hat{V}[k-1]. \quad (13)$$

El resultado del SPARC siempre va a ser negativo, y un mayor valor absoluto, indica que la estabilidad es peor.

Durante la ejecución de la tarea, el juego proporciona retroalimentación visual en tiempo real sobre el desempeño del usuario. Entre estas señales se incluyen la visualización simultánea de la trayectoria ideal y la trayectoria efectivamente realizada, así como cambios de color en la nave cuando el paciente colisiona con algún obstáculo. Adicionalmente, el juego cuenta un contador que le dice al usuario cuántos suministros lleva y cuántos le faltan, así como cuántas vidas tiene. Además, se muestra una barra que indica la estabilidad al jugador. Este tipo de retroalimentación ha demostrado ser eficaz en tareas de seguimiento y control motor, ya que ofrece información que permite al usuario ajustar su comportamiento mientras ejecuta la tarea (Sigrist et al., 2012). Finalmente, también se mide el tiempo en que el usuario tarda en completar las repeticiones del nivel.

2.3.1. Guardado de datos

Tras finalizar cada nivel, todos los datos de la partida son almacenados en formato 'csv'. Este contiene tanto las coordenadas de la trayectoria seguida por el usuario y de la trayectoria ideal, como los datos calculados de precisión y estabilidad, y las vidas y tiempo de la partida. Es importante guardar los datos de cada juego para analizar el progreso del paciente a lo largo de la terapia (Bouteraa et al., 2019).

2.4. Protocolo

El protocolo seguido por cada usuario ha consistido en una secuencia de los 5 niveles diseñados de menor a mayor dificultad con un total de 10 repeticiones de cada uno (una repetición consiste en ir a entregar el suministro y volver). El robot se configuró en dos niveles de resistencia (1 N y 5 N), registrando datos de estabilidad, errores cometidos, vidas perdidas (partiendo de un máximo de 5 vidas) y tiempo total de ejecución por cada sesión.

2.5. Usuarios

Dos participantes sanos (de 22 y 23 años; una mujer y un hombre) participaron en el estudio. Ninguno de ellos reportó trastornos neurológicos, musculoesqueléticos o del movimiento, y ambos eran diestros. Todos los participantes fueron informados sobre los procedimientos experimentales y proporcionaron su consentimiento informado por escrito antes de participar, incluido el consentimiento para la grabación de video e imágenes. El estudio se llevó a cabo de acuerdo con la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial y fue aprobado por el comité de ética de la Universidad Miguel Hernández de Elche (ref. III.JMAP.241216).

3. Resultados

En una primera etapa, se evaluó la interfaz con el ratón de la computadora. Esto permitió validar tanto el funcionamiento de la interfaz como los cálculos de las métricas y realizar los ajustes necesarios. A continuación, se realizó la integración en la plataforma robótica ArmMotus M2 Pro (Fourier) y validando el funcionamiento. Cada uno de los 2 usuarios realizó 10

repeticiones de cada uno de los cinco niveles tanto con nivel de resistencia 1 N como con 5 N.

La Figura 3 muestra a modo de ejemplo la trayectoria ideal del nivel 1 frente a las trayectorias realizadas por el usuario durante las 10 repeticiones de dicho nivel. Aunque puede observarse que el usuario sigue con bastante fiabilidad la trayectoria, no es capaz de seguirla perfectamente, lo que repercute en las métricas calculadas.

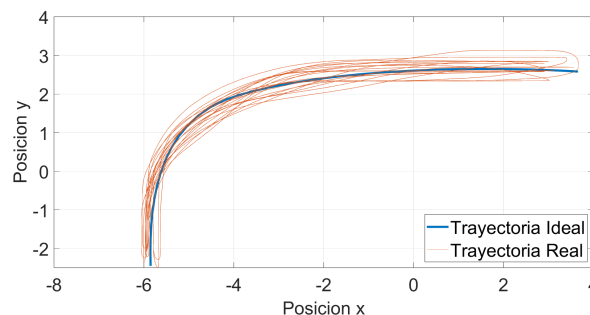


Figura 3: Trayectoria real vs. Trayectoria ideal del nivel 1.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de ambos participantes (U1 y U2). Para U1, el error fue generalmente menor con 1 N en los niveles 1–4, lo que sugiere una disminución de la precisión al incrementar la resistencia. Sin embargo, en el nivel 5 el error fue menor con 5 N, lo cual coincide con un mayor número de vidas perdidas bajo 1 N. En cuanto al tiempo de ejecución, se observó un incremento conforme aumentó la dificultad hasta el nivel 4, seguido de una reducción en el nivel 5 (en ambas resistencias y para ambos usuarios). Esto sugiere que la jerarquía de dificultad entre los niveles 4 y 5 podría revisarse, aunque el aumento en vidas perdidas con niveles más difíciles apoya, en general, la progresión propuesta.

Respecto a la estabilidad (SPARC), U1 mostró valores más negativos en la mayoría de los niveles con 5 N, indicando movimientos menos suaves bajo mayor resistencia. En contraste, U2 no presentó el mismo patrón: con 1 N se obtuvieron valores de SPARC más negativos en varios niveles (especialmente 2–4), y bajo esta condición se concentró un mayor número de vidas perdidas en los niveles 3–5. Finalmente, en el nivel 5 ambos usuarios exhibieron mayor suavidad con 1 N (SPARC menos negativo), pero aun así perdieron más vidas, lo que sugiere que la penalización no depende únicamente de la estabilidad, sino también de desviaciones respecto a la trayectoria ideal (error) y/o de la naturaleza punitiva del nivel.

4. Conclusiones

En este artículo se presentó una interfaz virtual gamificada para la rehabilitación del miembro superior, desarrollada en Unity e integrada con el robot ArmMotus M2 Pro (Fourier), basada en tareas de seguimiento de trayectoria con recolección de objetivos y evitación de colisiones en cinco niveles de dificultad. Se implementaron métricas cuantitativas para evaluar precisión, mediante la distancia promedio entre trayectoria ideal y real, y estabilidad, estimada tanto en tiempo real con un cociente de velocidades tangenciales como posteriormente mediante SPARC. La validación preliminar con participantes sanos y dos

Tabla 1: Resultados de las métricas utilizando la interfaz.

Resistencia		Mínima (1 N)					Máxima (5 N)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
U1	SPARC	-4.01	-3.55	-3.69	-3.57	-2.75	-3.77	-3.92	-4.05	-3.94	-3.13
	Error	0.15	0.11	0.22	0.17	0.20	0.20	0.15	0.29	0.18	0.17
	Tiempo [s]	77.42	60.04	126.02	193.79	185.53	81.15	64.98	131.21	197.56	179.37
	Vidas Perdidas	0	0	0	1	2	0	0	0	2	1
U2	SPARC	-3.35	-4.08	-3.78	-3.87	-2.25	-3.80	-3.61	-3.62	-3.83	-3.12
	Error	0.25	0.18	0.37	0.19	0.29	0.29	0.17	0.33	0.20	0.22
	Tiempo [s]	81.04	59.84	133.55	274.59	232.49	94.54	76.02	135.36	218.08	200.21
	Vidas Perdidas	0	0	1	2	4	0	0	0	0	3

condiciones de resistencia (1 N y 5 N) sugiere que estas métricas son sensibles a variaciones de dificultad y resistencia. Como trabajo futuro, se plantea integrar señales electromiográficas (EMG) para relacionar la actividad muscular con las métricas, así como el desarrollo de un modo personalizable que permita al terapeuta diseñar trayectorias específicas según los objetivos terapéuticos. De igual manera, se harán pruebas experimentales con un mayor número de usuarios para obtener evidencia más sólida sobre el comportamiento de las métricas. Asimismo, se prevé evaluar el sistema en personas con patologías neurológicas, como accidente cerebrovascular o lesiones neurológicas, con el fin de analizar su posible utilidad en la evaluación objetiva de la función motora como en procesos de rehabilitación del miembro superior.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto GARMOR con referencia PID2022139105OB-I00, financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033. Esta investigación también ha sido financiada por la ayuda PID2024-156759OB-C31 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por ERDF, EU.

Referencias

Balasubramanian, S., Melendez-Calderon, A., Roby-Brami, A., Burdet, E., Dec 2015. On the analysis of movement smoothness. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 12 (1).
DOI: 10.1186/s12984-015-0090-9

Bouteraa, Y., Abdallah, I. B., Elmogy, A. M., 2019. Training of hand rehabilitation using low cost exoskeleton and vision-based game interface. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 96, 31–47.
DOI: 10.1007/s10846-018-0966-6

Colombo, R., 2018. Chapter 8 - performance measures in robot assisted assessment of sensorimotor functions. In: Colombo, R., Sanguineti, V. (Eds.), *Rehabilitation Robotics*. Academic Press, pp. 101–115.
DOI: 10.1016/B978-0-12-811995-2.00011-4

Colombo, R., Pisano, F., Micera, S., Mazzone, A., Delconte, C., Carrozza, M., Dario, P., Minuco, G., 2005. Robotic techniques for upper limb evaluation and rehabilitation of stroke patients. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 13 (3), 311–324.
DOI: 10.1109/TNSRE.2005.848352

Fluet, G., Patel, J., Qiu, N. Q., Yarossi, M., Adamovich, S., Merians, A., Tunik, E., 2017. Early versus delayed VR-based hand training in persons with acute stroke. In: *International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*. pp. 1–7.
DOI: 10.1109/ICVR.2017.8007490

Guan, C., 2013. Brain-computer interface for stroke rehabilitation with clinical studies. In: *2013 International Winter Workshop on Brain-Computer Interface (BCI)*. pp. 4–5.
DOI: 10.1109/IWW-BCI.2013.6506607

Gutiérrez, Á., Sepúlveda-Muñoz, D., Gil-Agudo, Á. M., de los Reyes Guzmán, A., 2020. Serious game platform with haptic feedback and emg monitoring for upper limb rehabilitation and smoothness quantification on spinal cord injury patients. *Applied Sciences*.
DOI: 10.3390/app10030963

Hasan, Z., Karst, G. M., 1989. Muscle activity for initiation of planar, two-joint arm movements in different directions. *Experimental Brain Research*.
DOI: 10.1007/BF00248921

Kyrkjebø, E., Johan Laastad, M., Stavadahl, , 2018. Feasibility of the ur5 industrial robot for robotic rehabilitation of the upper limbs after stroke. In: *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. pp. 1–6.
DOI: 10.1109/IROS.2018.8594413

Loreto, I. D., Gouaich, A., Hocine, N., 2012. Mixed reality serious games for post-stroke rehabilitation. *IEEE*.
DOI: 10.4108/icst.pervasivehealth.2011.246102

Marchal-Crespo, L., Reinkensmeyer, D. J., 2009. Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*.
DOI: 10.1186/1743-0003-6-20

Mukherjee, N., Adak, A., Ghosh, S., 2020. Recent trends in the development of peptide and protein-based hydrogel therapeutics for the healing of cns injury. *Soft Matter* 16, 10046–10064.
DOI: 10.1039/D0SM00885K

Rodríguez-de Pablo, C., Popović, M., Savić, A., Perry, J. C., Belloso, A., Tomić, T. D., Keller, T., 2016. Post-stroke Robotic Upper-Limb Telerehabilitation Using Serious Games to Increase Patient Motivation: First Results from ArmAssist System Clinical Trial. *Springer International Publishing, Cham*, pp. 63–78.
DOI: 10.1007/978-3-319-26242-0_5

Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., Wolf, P., 2012. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychonomic Bulletin & Review* 20, 21 – 53.
DOI: 10.3758/s13423-012-0333-8

Smith, Z., Nov. 2024. Hemiparesis vs hemiplegia: What's the difference? Accessed: 2026-02-09.
URL: <https://constanttherapyhealth.com/brainwire/hemiparesis-vs-hemiplegia/>

Whittinghill, D., Herring, D. G., Apr. 2017. A comparison of text-annotated vs. purely visio-spatial instructions for video game input sequences. *Comput. Entertain.* 15 (2).
DOI: 10.1145/2700527