

# Cuantificación del Avance en Terapia de Rehabilitación de Miembros Superiores Mediante el Uso de una Interfaz Háptica y Realidad Aumentada

A.M. Torres Hernández, B.E. Amaro Amaro, V.I. Ramírez Vera, M.O. Mendoza Gutiérrez, I. Bonilla Gutiérrez  
Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Av. Salvador Nava s/n, Zona Universitaria, San Luis Potosí, S.L.P. 78290 México  
E-mail: marco.mendoza@uaslp.mx

**Resumen**—En este trabajo se presenta un análisis cuantitativo del progreso de pacientes, los cuales asisten a terapia ocupacional y hacen uso de una interfaz háptica basada en realidad aumentada, que permite una estimulación visual y táctil del usuario. A la par, se lleva a cabo un registro de la señal de electromiografía (EMG), para su procesamiento y análisis. Una vez finalizada cada sesión de terapia, se realiza un análisis de la actividad muscular, las trayectorias realizadas y el correspondiente error de seguimiento, esto con el fin de cuantificar el avance de los pacientes y evaluar su progreso, y de ser necesario, en un futuro implementar mejoras y adecuaciones en el sistema.

## I. INTRODUCCIÓN

La realidad aumentada (RA) está relacionada con la realidad virtual (RV), la principal diferencia es que la RA no reemplaza el mundo real por uno virtual, sino que mantiene el mundo real que el usuario ve, complementándolo con información virtual superpuesta al entorno real, haciendo que el usuario pueda interactuar con esa información sin perder contacto con el mundo real que tiene al alcance de su vista. En general, la RA se define como la visión de un entorno real combinado con elementos virtuales, creando una realidad mixta [1].

Las terapias de rehabilitación asistidas por sistemas robóticos se han popularizado en las últimas décadas, debido a los buenos resultados obtenidos en diversos estudios clínicos [2]. En particular, la interfaz háptica utilizada en este trabajo, se presenta detalladamente en [2]. De manera general este sistema utiliza RA y hace posible combinar imágenes reales con objetos virtuales; mediante una cámara se captura la escena real, que incluye algunos marcadores, una vez que algún marcador es detectado se compara con un patrón geométrico bien definido, si su correlación excede un umbral éste se toma como un marcador correcto y se convierte en el sistema de referencia para trazar los objetos virtuales. Mediante el dispositivo háptico es posible ejercer sobre la mano del usuario las fuerzas necesarias para simular el contacto con los objetos virtuales. Lo que permite implementar juegos de video para realizar distintos ejercicios de terapia en un sistema visualmente atractivo y estimulante para el paciente.

La señal de EMG ha sido utilizada para conocer el avance en la rehabilitación en ciertas enfermedades con afección de miembro superior como es la hemiplejía [3]. Es por eso que se considera necesario su estudio para conocer el estado del músculo tratado antes y después de ésta, esto con el fin de

evaluar si el trabajo realizado ha brindado al paciente las mejoras esperadas. El tratamiento de la señal de EMG para diagnóstico cuantitativo puede realizarse mediante diferentes técnicas, como lo son el análisis temporal y frecuencial de la señal, de los cuales se pueden obtener índices que nos ayudan a saber la condición del músculo en diferentes etapas. En particular, en este trabajo, los índices calculados en el dominio del tiempo fueron el valor cuadrático medio (RMS) y la longitud de onda (wL) [4]; en el dominio de la frecuencia se utiliza la potencia total (PT) del espectro y la frecuencia mediana (MDF) [5]. Se sugiere que la primera etapa sea una etapa de control en la que el músculo esté completamente relajado, esto para poder ver claramente la diferencia entre contracción y relajación [6]. Además, para cuantificar el avance de los pacientes se calculó el error absoluto promedio, que es un indicador del error acumulado de la trayectoria medida respecto a una trayectoria ideal.

## II. METODOLOGÍA

El estudio se realizó con diez pacientes de diferentes edades, sin embargo, en este trabajo sólo se consideraron los resultados de dos sujetos ya que fueron los que asistieron constantemente a la terapia de rehabilitación y se pudo constatar una evolución adecuada de ambos. El diagnóstico del sujeto 1 es artrogriposis, esta enfermedad se trata de un grupo heterogéneo de alteraciones del esqueleto que se manifiestan en el momento del nacimiento mediante contracturas articulares múltiples. Estas contracturas resultan de la limitación de la motilidad articular, bien primaria o secundaria, a anomalías neurológicas (centrales o periféricas), musculares, del tejido conectivo o del propio esqueleto [7]. Es decir que los pacientes con artrogriposis presentan rigidez en una o más articulaciones entre otros síntomas, para este sujeto se adquirió la señal del músculo flexor de los dedos el cual es el responsable del agarre de la mano [8]. El diagnóstico del sujeto 2 es amputación transcarpiana (desarticulado de muñeca), el sujeto tiene una prótesis mecánica. La amputación es un procedimiento quirúrgico que comprende la extirpación de una extremidad/miembro (brazo o pierna) o parte de un miembro (como un dedo del pie, de la mano, un pie o una mano), en general como consecuencia de una lesión, enfermedad, infección o cirugía. En este sujeto

se toma la señal del músculo deltoides ya que éste es el responsable del agarre de su prótesis.



Fig. 1: Sujeto realizando un ejercicio de terapia con el sistema.

### A. Sistema robótico

El ejercicio de terapia consiste en trabajar en un entorno de RA donde se proyectan objetos virtuales en 5 marcadores que deben ser captados por una cámara de video (ver Fig. 2), este entorno puede visualizarse ya sea en el monitor de una computadora, o para una mejor inmersión haciendo uso de unos lentes Oculus Rift. El número de marcadores seleccionados es para garantizar un sistema robusto a oclusiones, una vez que alguno de los marcadores es detectado por la cámara, aparecen cinco esferas localizadas una sobre cada marcador y a diferentes alturas. El objetivo es tocar las esferas por medio del dispositivo háptico, el ejercicio inicia cuando una de las esferas se ilumina de color rojo indicando al usuario que debe guiar al cursor hasta ella y tocarla; una vez que se llega a la esfera objetivo, la cual se logra sentir gracias al dispositivo háptico, ésta regresa a su color original y otra esfera cambia de color a rojo convirtiéndose en el nuevo objetivo. El número de repeticiones (esferas objetivo) puede ser seleccionado por el terapeuta (5, 10, 15 o 20), y dependiendo de las necesidades del sujeto se selecciona un programa de terapia apropiado.

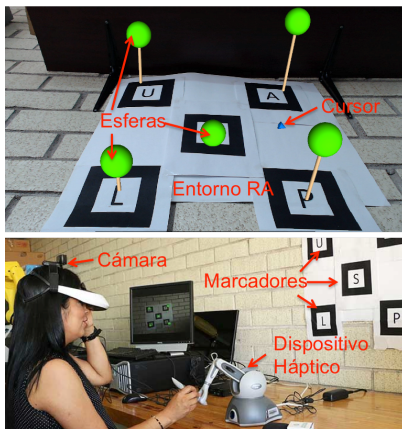


Fig. 2: Sistema robótico: Interfaz háptica basada en RA.

### B. Análisis EMG

Adicionalmente, se realiza el registro de la señal de EMG mediante un sistema Biopac. La colocación de los electrodos para registrar la actividad muscular de los sujetos fue: para el sujeto 1, el músculo flexor superficial de los dedos y para el sujeto 2, el deltoides posterior. El electrodo de referencia fue colocado en el codo en ambos casos. El protocolo a seguir para la adquisición de la señal de EMG de los músculos mencionados fue: antes de iniciar la terapia se tomó un primer registro, el cual consiste en 20 segundos de control, después se le pidió al sujeto que realizara una contracción máxima durante 5 segundos, para esto se hace uso de un objeto sólido (juguete de hule) para facilitarle a los sujetos la maniobra ya que ninguno podía realizarla con un dinamómetro o similar, se descansan otros 10 segundos y se repite esta maniobra 5 veces, al final en el registro se obtiene la información de 5 contracciones espaciadas por 10 segundos. Al terminar la terapia se tomó un segundo registro con el mismo procedimiento. Estos registros se realizaron en dos periodos de tiempo, para el sujeto 1 transcurrieron 38 días para la segunda adquisición y para el sujeto 2 transcurrieron 14 días.

Se analizaron índices en el dominio de la frecuencia como son: PT la cual es la integral bajo el espectro de la señal de EMG y nos brinda información acerca de la fuerza muscular [8] y MDF que es el valor en el que el espectro se divide en dos regiones de igual potencia, la cual nos indica fatiga muscular [9]. De igual forma en el dominio del tiempo se obtiene el valor de RMS, el cual es un reflejo de la potencia media de la señal, y wL que es la suma acumulada de la longitud de la señal sobre un segmento de tiempo, que nos brindan información de la energía y complejidad de la señal respectivamente [4], gracias a esto podemos conocer las condiciones del músculo. Las fórmulas para el cálculo de los índices son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_m^2} & \text{wL} &= \sum_{m=1}^M |x_{m+1} - x_m| \\ \text{PT} &= \sum_{j=1}^N P_j & \text{MDF} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N P_j \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $x_m$  representan las muestras de la señal de EMG,  $M$  es el número total de muestras,  $P_j$  son las componentes del espectro de la señal y  $N$  la longitud total de frecuencias.

### C. Análisis de trayectorias

El sistema de rehabilitación robótico utilizado entrega como reporte de la terapia realizada un archivo de texto en el cual se guardan las coordenadas  $(x, y, z)$  del cursor, un vector de tiempo en el cual fue realizada y el número de la esfera objetivo. Se tomaron como muestras a analizar los resultados de ambos sujetos en la sesión inicial y como segunda muestra, los resultados de la terapia después de 3 meses; para el sujeto 1 con 5 esferas y para el sujeto 2 con 20 esferas. Cabe mencionar que los sujetos asistieron dos veces por semana a las sesiones, realizando la modalidad completa de la terapia. Se hizo un

análisis cualitativo de las trayectorias que se siguieron para llegar a cada una de las esferas, observando, mediante una simulación del sistema en una GUI del software MATLAB, el recorrido realizado en la primera muestra y comparándolo con la muestra número dos. Como otra medida para cuantificar el avance en la terapia se utilizó el cálculo del error absoluto medio (EAM) entre la posición del cursor y la posición de la esfera objetivo, el cual está definido por la siguiente ecuación:

$$EAM = \frac{|p_m - p_i|}{n} \quad (3)$$

donde  $p_m$  representa la posición medida del cursor en cada movimiento,  $p_i$  la posición ideal, que es en donde el error es igual a cero, y  $n$  el número de muestras. Para calcular el EAM en MATLAB se utilizó el archivo de texto extraído del sistema, del cual se toman las posiciones del cursor como  $p_m$ , y mediante la función `linspace` se genera el vector de posiciones ideales  $p_i$ , teniendo como parámetros el centro de la esfera y la posición inicial del cursor.

### III. RESULTADOS

Las señales de EMG obtenidas para ambos sujetos, y sus espectros correspondientes, se presentan en la Fig. 3, respectivamente.

Una vez realizadas las adquisiciones de señales EMG correspondientes a cada sujeto se evaluaron los cuatro índices correspondientes y cuyos resultados son presentados en las Tablas I y II.

TABLA I: Índices calculados en el periodo de contracción del sujeto 1 (AT: antes de la terapia y DT: después de la terapia)

Índice	AT (adq. 1)	DT (adq. 1)	AT (adq. 2)	DT (adq. 2)
PT ( $ms^2$ )	30378±1348	26982±270	38892±58.9	43230±976.8
MDF (Hz)	256.49±1.27	249.39±1.6	228.29±0.98	222.59±6.5
RMS	0.1957	0.1800	0.2579	0.2893
wL	550.3690	500.1089	744.3286	859.7678

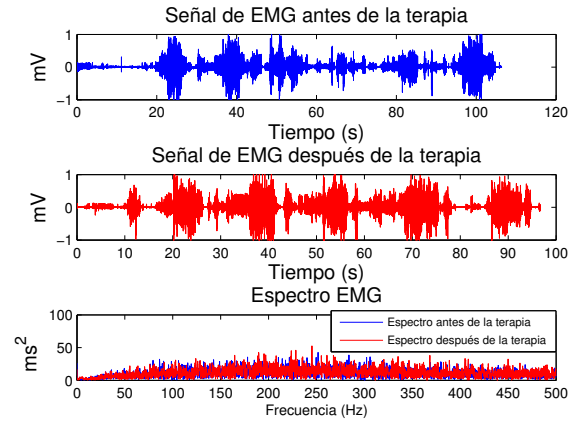
TABLA II: Índices calculados en el periodo de contracción del sujeto 2 (AT: antes de la terapia y DT: después de la terapia)

Índice	AT (adq. 1)	DT (adq. 1)	AT (adq. 2)	DT (adq. 2)
PT ( $ms^2$ )	7366±1308	5939.7±712	2488.1±14.6	3265±487.45
MDF (Hz)	73.24±15.9	81.49±3.53	78.74±0.35	85.99±4.24
RMS	0.2614	0.2614	0.0957	0.1375
wL	140.2341	155.54	61.1777	79.5895

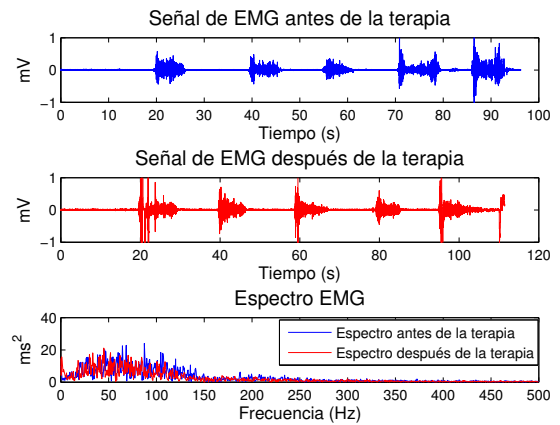
Por otra parte, las trayectorias generadas por los sujetos en las dos fases de la terapia se presentan en la Fig. 4. Se puede apreciar un mejor control en el seguimiento de trayectorias después de tres meses de terapia (ver Fig. 4b y 4d), ya que en la fase inicial ambos sujetos presentan un comportamiento más errático (ver Fig. 4a y 4c).

### IV. DISCUSIÓN

Respecto al análisis de EMG, los resultados obtenidos del sujeto 1 son acorde a lo esperado, ya que se observa un mayor desarrollo de fuerza y además hay fatiga muscular después de realizar la terapia (ver Tabla I). Por otra parte, durante la adquisición, el sujeto 2 no lograba mantener la contracción



(a) Sujeto 1



(b) Sujeto 2

Fig. 3: Señales y espectro de EMG de los sujetos.

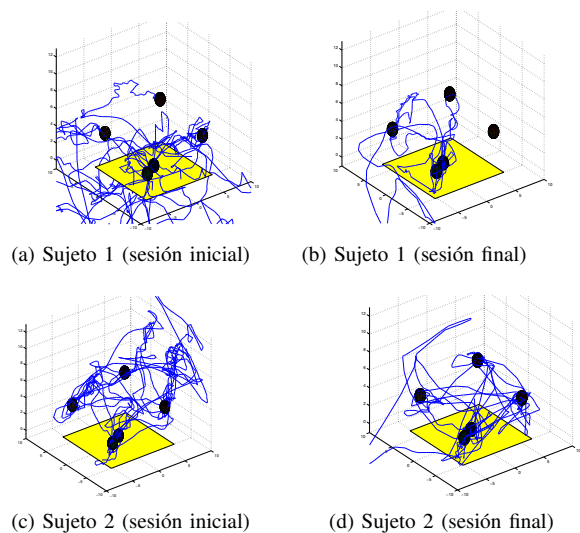


Fig. 4: Trayectorias seguidas por los sujetos.

durante 5 segundos, por lo que se tuvo que reducir el periodo de análisis de la señal, esto pudo haber afectado los resultados; para este sujeto no se observan los resultados esperados en índices como PT y wL, ya que se ven disminuidos después de los 14 días. La MDF no se ve disminuida después de la terapia, para ningún caso (ver Tabla II).

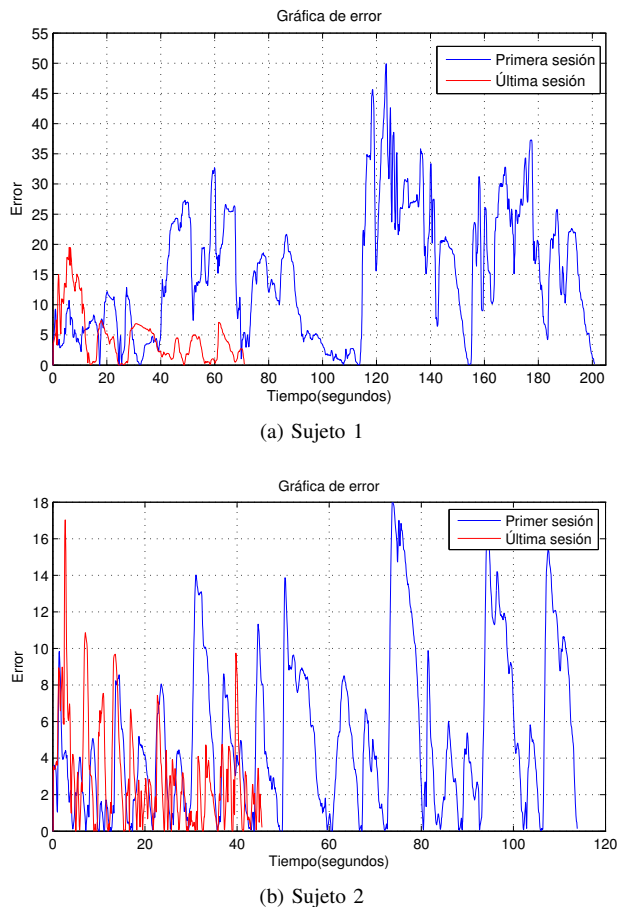


Fig. 5: Errores de seguimiento de trayectoria de los sujetos.

Ahora al analizar las trayectorias de las Fig. 4a y 4b, en el caso del sujeto 1 se observan grandes cambios, dando como resultado una trayectoria fina que oscila cerca de las esferas después de recibir las sesiones de terapia (ver Fig. 4b). En la Fig. 5a se presenta el error de las dos sesiones, en la primera sesión se realizó el ejercicio en 200.57 segundos con un error de 18.9 contra la última sesión de 72.41 segundos y un error de 6.81, dando como resultado un avance notorio del sujeto después de la terapia, de manera cuantitativa se observa una mejora mayor al 60% en el control y rapidez de sus movimientos.

En la Fig. 4c se observa que la trayectoria del sujeto 2 es inestable, y los movimientos se concentran lejos de las esferas; sin embargo, en la última sesión, presentada en la Fig. 4d, la trayectoria es más estable y se concentra cerca de las esferas, a excepción de algunos movimientos que salen de la gráfica, debido a que al inicio de la sesión se busca el cursor dentro de la pantalla realizando movimientos rápidos. En la Fig. 5b

se graficó el error de ambas sesiones, en la primera concluyó la prueba en 116.21 segundos con un error promedio de 7.3, comparada contra la última sesión que se terminó en 45.22 segundos con 4.7 de error promedio, se puede ver como los intervalos de tiempo son menores entre los toques de cada esfera, lo cual muestra diferencias significativas, tanto en la magnitud del error, como en el tiempo en concluir la sesión, mejorando cuantitativamente en más de un 35% con respecto a su estado inicial.

## V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se logró evaluar de manera cuantitativa el proceso de rehabilitación de dos pacientes que hacen uso de una interfaz háptica para tratamiento de problemas en el control de movimiento fino en extremidades superiores. En primer lugar, en el caso del análisis de EMG para el sujeto 2 no se obtuvieron los resultados esperados, observando una mejor respuesta al analizar su comportamiento en el seguimiento de trayectoria. Por lo que ambas técnicas se complementan, obteniendo resultados favorables al cuantificar el avance de los pacientes. En el caso del sujeto 1 ambas técnicas de análisis arrojaron resultados satisfactorios sobre la funcionalidad del sistema.

Como trabajo a futuro, se pretende mejorar el proceso de extracción de la señal de EMG, así como un periodo de mayor tiempo entre registros para el sujeto 2, con la finalidad de obtener resultados más concluyentes con esta herramienta de análisis. Además, se pretende diseñar diferentes juegos para terapia que permitan obtener más resultados satisfactorios y al mismo tiempo incrementar el nivel de estimulación de los pacientes al realizar sus sesiones de terapia.

## REFERENCIAS

- [1] C. González-Morcillo, D. Vallejo-Fernández, J.A. Albusac-Jiménez y J. Castro-Sánchez, Realidad aumentada: Un enfoque práctico con AR-ToolKit y Blender. Bubok publishing S.L., 1a. edición, 2011.
- [2] C. Vidrios, I. Bonilla, F. Viguera, M. Mendoza, "Development of a Haptic Interface for Motor Rehabilitation Therapy using Augmented Reality", 37th Annual Int. Conf. of the IEEE EMBS, Milán, Italia, 2015.
- [3] Z. Fan, C. Zhao, L. Luo, S. Huang, "Study on sEMG-Based Exercise Therapy for Upper Limb of Severe Hemiplegic Patients", 35th Annual Int. Conf. of the IEEE EMBS, 2013.
- [4] A. Phinyomark, G. Chujit, P. Phukpattaranont, C. Limsakul, "A Preliminary Study Assessing Time-Domain EMG Features of Classifying Exercise in Preventing Falls in the Elderly", 9th Int. Conf. Electr. Engineering/Electronics, Computer, Telecomm. and Information Tech., 2012.
- [5] S. Thongpanja, A. Phinyomark, P. Phukpattaranont, C. Limsakul. "Mean and Median Frequency of EMG Signal to Determine Muscle Force base on Time-dependent Power Spectrum", Elektronika ir Elektrotechnika, Vol. 16(3), pp. 51-56, 2013.
- [6] A.F. Ruiz, F.J. Brunetti, E. Rocon, A. Forner-Cordero, J.L. Pons, "Adquisición y procesamiento de información EMG en el modelado de sistemas biológicos", Jornadas de Automática, 2007.
- [7] F. Bonilla-Musoles, L. Machado, L.A. Bailao, N. Osborne, S. García-Galiana, T. Bailao, J. Blanes, M.C. Rizzi, F. Raga, "Artrogriposis múltiple congénita (contracturas congénitas múltiples): revisión". *Progresos de Obstetricia y Ginecología*, Vol. 45(4), pp. 150-156, 2002.
- [8] M. Mulas, M. Folgheraiter, G. Gini, "An EMG-controlled Exoskeleton for Hand Rehabilitation", 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005.
- [9] G. Kim, M. Ahad, M. Ferdjallah, G. Harris, "Correlation of Muscle Fatigue Indices between Intramuscular and Surface EMG Signals?", *Proceedings IEEE SoutheastCon*, 2007.