

SEGUIMIENTO VISUAL Y CARACTERIZACIÓN DE MOVIMIENTOS TERAPÉUTICOS DEL BRAZO HUMANO

VISUAL MONITORING AND CHARACTERIZATION OF THERAPEUTIC MOVEMENTS OF THE HUMAN ARM

Samuel Alvarado Agama

Tecnológico Nacional de México / IT de Acapulco, México
mg18320001@acapulco.tecnm.mx

Miriam Martínez Arroyo

Tecnológico Nacional de México / IT de Acapulco, México
miriam.ma@acapulco.tecnm.mx

José Antonio Montero Valverde

Tecnológico Nacional de México / IT de Acapulco, México
jose.mvv@acapulco.tecnm.mx

Recepción: 4/enero/2021

Aceptación: 27/abril/2021

Resumen

Este artículo presenta los resultados en la construcción de un sistema de seguimiento visual que logra mediante visión computacional, rastrear y reconstruir tridimensionalmente movimientos terapéuticos del brazo humano, en específico de dos movimientos terapéuticos: flexión-extensión y movimiento circular para apoyar el plan de recuperación de pacientes con derrame cerebral. Se emplean cintas de colores que se colocan en las articulaciones como distintivos para rastrear los movimientos del brazo. Estas marcas de color se capturan con dos webcams y se estima la posición tridimensional de cada marcador para reconstruir el brazo en una estructura de alambre 3D. Las características relevantes del movimiento (como el ángulo entre el brazo y el antebrazo) se extraen y almacenan para que esta información de las trayectorias pueda ser comparada con la de una persona sana.

Palabras Clave: Reconstrucción de movimientos, información de trayectorias, visión computacional.

Abstract

This article presents the results in the construction of a visual monitoring system that achieves, through computer vision, to track and reconstruct three-dimensional

therapeutic movements of the human arm, specifically of two therapeutic movements: flexion-extension and circular movement to support the recovery plan of stroke patients. Colored ribbons are used that are placed in the joints as badges to track the movements of the arm. These colored marks are captured with two webcams and the three-dimensional position of each marker is estimated to reconstruct the arm into a 3D wireframe. Relevant characteristics of the movement (such as the angle between the arm and the forearm) are extracted and stored so that this information on the trajectories can be compared with that of a healthy person.

Keywords: *Reconstruction of movements, trajectory information, computer vision.*

1. Introducción

La comprensión y detección de gestos corporales en secuencias visuales tiene un valor elevado para muchas aplicaciones, como son las interfaces inteligentes y la interacción humano-robot. Dados los avances en el campo de la visión computacional, hoy en día se tienen cambios altamente disruptivos en la manera como se interactúa con las computadoras. La mayoría de los trabajos se centra en la clasificación de los movimientos del cuerpo humanos, es decir, en clasificar una secuencia visual como parte de un conjunto predefinido de tipos de movimientos [Michel-Vera et al., 2018]. También existen desarrollos que buscan calificar ciertos gestos; es decir, comparar un movimiento humano contra un patrón de referencia y devolver una medida de qué tan cerca está el gesto observado de la referencia. Por ejemplo, en el entrenamiento deportivo o de danza, es interesante saber qué tan bien se desempeñó el aprendiz en comparación al movimiento deseado. En este trabajo se está particularmente interesado en la rehabilitación después de un accidente cerebrovascular.

En la actualidad existen desarrollos tecnológicos que asisten el proceso de recuperación en las personas con secuelas de derrame cerebral, a través de sistemas robóticos [Ren et al., 2017] [Kim et al., 2013] y algunos con sistemas visuales [Santos et al., 2013], sin embargo son desarrollos costosos y complejos de implementar.

El uso de métodos de seguimiento visual usando marcadores distintivos representa una buena opción para rastrear las extremidades de una persona con enfoque hacia la rehabilitación, pues es una solución de bajo costo que no necesita equipo especializado (Alvarado et al., 2019).

Por lo tanto, el propósito de la investigación es la localización y seguimiento de las extremidades superiores de una persona con discapacidad motriz a causa de un derrame cerebral, mediante una secuencia de imágenes capturadas por dos webcams, así como extraer y almacenar información de la trayectoria del gesto para que se pueda comparar el movimiento con el de una persona sana.

2. Método

La investigación presentada en este artículo se realizó con un enfoque cuantitativo. El sistema se encarga de localizar y seguir en secuencias de video tomadas con dos webcams, 3 marcas de color adheridas a las articulaciones del brazo de un paciente para representarlo en un modelo de estructura de alambre en el espacio tridimensional lo que permite extraer y almacenar las características del movimiento más relevantes, los módulos del sistema se ilustran en la figura 1.

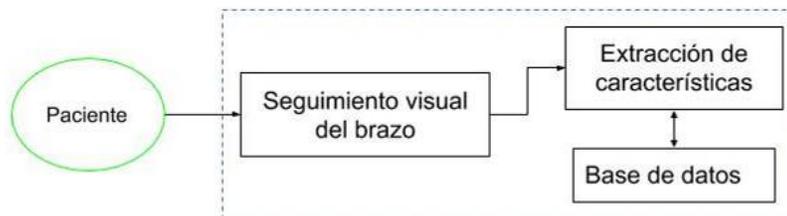


Figura 1 Diagrama de bloques del sistema.

En la figura 2 se observa el ambiente de trabajo. La distancia seleccionada entre las cámaras y el individuo con base en la experimentación y que devolvió los mejores resultados es de 2.5 m aproximadamente. En los experimentos las cámaras de video se colocaron a 1.5 m de distancia entre sí. Se emplearon cintas de color de colores diferentes para ubicar las articulaciones del brazo de la persona. Se uso color amarillo para el hombro, rojo para el codo y azul para la muñeca. También se utilizó ropa oscura ya que facilita la segmentación de las regiones de interés. Los

experimentos se realizaron utilizando de fondo una pared oscura y se iluminó el espacio con luz artificial.

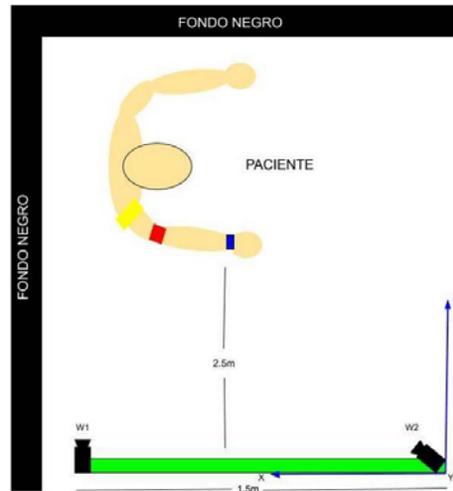
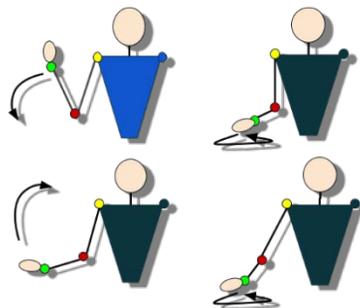


Figura 2 Ambiente de trabajo.

Selección de los gestos terapéuticos

En este trabajo se considera gesto al movimiento del brazo del paciente durante el proceso de rehabilitación, tomado de una sesión de terapia. Los gestos seleccionados se tomaron de la clasificación general de los movimientos articulares que se presentan en el tronco y brazo propuesta por (KOTTKE & LEHMANN, 1994), los cuales son flexión-extensión y movimiento circular. Para realizar un gesto de flexión-extensión, el individuo debe primero extender el brazo y flexionarlo en una dirección paralela al torso, y luego devolverlo a la posición inicial como se ilustra en la figura 3a.



a) flexión-extensión. b) circular

Figura 3 Gesto.

En un gesto circular, el usuario extiende su brazo hacia adelante con la palma hacia abajo, y luego mueve la mano de manera circular en sentido inverso a las manecillas del reloj, para volver a su posición original como se puede ver en la figura 3b.

Seguimiento visual de las marcas

El seguimiento visual del brazo se puede representar en 4 etapas las cuales se ilustran en un diagrama de bloques secuencial en la figura 4:

- *Calibración de las cámaras de video.* En esta etapa se estiman los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las video cámaras, elementos requeridos para adquirir la posición tridimensional de las cintas de color. Los parámetros intrínsecos se obtienen utilizando un tablero de ajedrez como patrón de calibrado. El patrón se coloca enfrente de la cámara a una distancia determinada para que las esquinas del tablero puedan ser detectadas utilizando la librería [OpenCV, 2020]. Los parámetros extrínsecos se obtienen manualmente midiendo la posición y orientación de las cámaras con respecto al origen del sistema de referencia de mundo, en la figura 2 muestra el sistema de referencia del mundo y la colocación de las cámaras, las cuales están colocadas paralelamente al eje X separadas a 1.5 m de distancia. La cámara 2 esta girada en relación con el eje Y, el individuo se encuentra colocado frente a las cámaras.

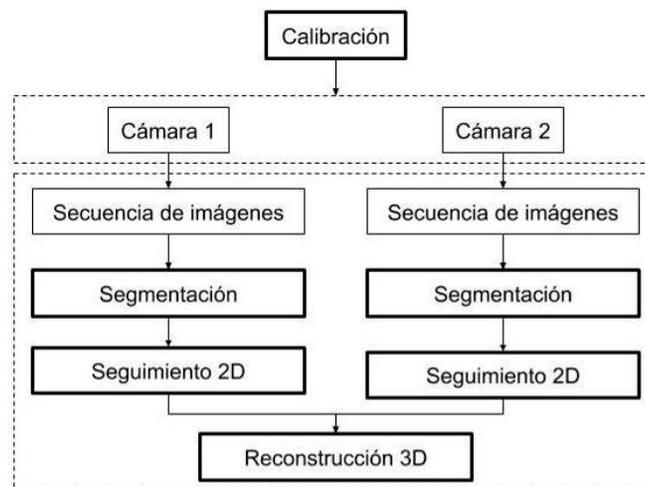


Figura 4 Diagrama de bloques del seguimiento visual.

- **Segmentación de regiones de interés.** Es el procedimiento a través del cual se estiman cuales pixeles de la imagen son pertenecientes al objeto de interés, en esta fase se utilizó una técnica basado en pixeles llamada histograma de retroproyección propuesta por [Swain & Ballard, 1991], pero puede ser una técnica basada en bordes o regiones dependiendo las características de lugar, en la experimentación esta técnica devolvió los mejores resultados dadas las condiciones de ambiente, para localizar las marcas de color adheridas al brazo, este método se basa en representar objetos mediante sus histogramas de color. En la figura 5 se muestra el proceso de segmentación, en la figura 5a, se observa la imagen original, en figura 5b, el histograma bidimensional en el espacio de color (H, S) el cual muestra la distribución del color rojo y en figura 5c, imagen resultante cuando se aplica retroproyección de histograma.

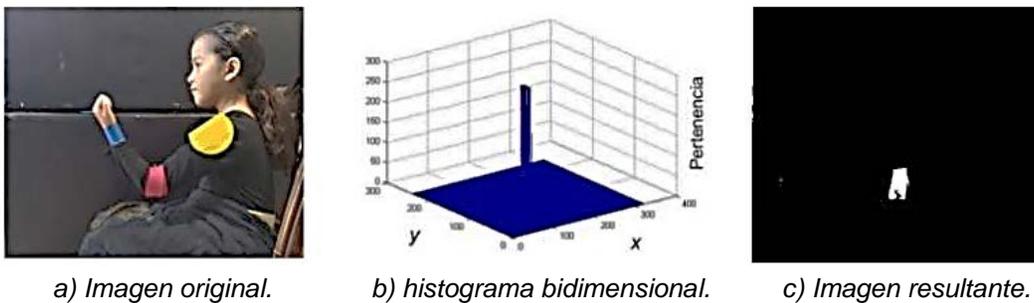


Figura 5 Proceso de segmentación.

Se puede ver en la figura 6 la posición inicial de la marca de color, figura 6a, centro de gravedad del objeto, y figura 6b, ventana de seguimiento inicial. En la figura 7 se puede observar una secuencia de imágenes que muestran el proceso de seguimiento de las marcas de color cuando se realiza el gesto de flexión-extensión. Luego de la segmentación de las cintas de color, lo que sigue es obtener las posiciones iniciales de todas ellas partiendo de las imágenes segmentadas. Empleando para esto los momentos de orden 0 y 1 [Gómez-Allende, 1993], ya que esto permite obtener las coordenadas de la ventana a utilizar en el seguimiento, para así reducir los cálculos de la siguiente etapa.



a) Centro de gravedad del objeto. b) Ventana de seguimiento.

Figura 6 posición inicial de la marca de color.



Figura 7 Seguimiento de las cintas de color.

- *Seguimiento 2D.* Luego de la localización de las marcas a seguir, en esta etapa se lleva a cabo el seguimiento de las articulaciones en una secuencia de imágenes, aplicando para tal fin el algoritmo de seguimiento de objetos basado en color propuesto por Gary Bradski [Bradski, 1998], el proceso es aplicado en la ventana de seguimiento que fue definida en la etapa anterior. Para mantener la segmentación de las zonas de color durante el seguimiento se utiliza la retroproyección de histograma. De este modo se obtienen las posiciones de las marcas de color de cada articulación del brazo. En la figura 7 se puede ver una secuencia de imágenes en las cuales se aplica el algoritmo de seguimiento de las tres cintas de color, el punto en las marcas especifica el centroide de la ventana de seguimiento, y por lo tanto la posición de la marca en el espacio 2D de la imagen.
- *Reconstrucción 3D.* Luego de que se han obtenido las posiciones de cada marca en el plano bidimensional de las imágenes capturadas por las cámaras de video, lo siguiente es calcular esa posición en el espacio tridimensional.

Muchas metodologías para el seguimiento del cuerpo humano o alguna de sus partes en el plano 3D utilizan enfoques basados en modelos. Aunque dichas técnicas brindan precisión en la reconstrucción del cuerpo humano y permiten modelar su dinámica, requieren altos costos computacionales.

El sistema de visión basado en una sola cámara presenta incertidumbre en la distancia del objeto detectado. Esta incertidumbre se puede reducir agregando información sobre el tamaño del objeto al sistema, con ello se puede estimar la distancia a la que se encuentra el objeto, partiendo de su tamaño en la imagen. Una alternativa para obtener la profundidad es utilizar varias cámaras para observar la misma escena. Este método no requiere información externa al sistema acerca del tamaño de los objetos. Al contar con dos cámaras, se puede realizar el proceso de triangulación para detectar un cierto punto de interés del objeto buscado en las dos imágenes, en este caso, los centroides de las ventanas de seguimiento del brazo. La metodología de estimación de la posición 3D del brazo humano se basa en la propuesta por [Barrera González & Cañas, 2004], consiste en proyectar las líneas de visión de dos cámaras al objeto buscado, según un modelo geométrico. En la figura 8 se muestra la posición tridimensional del objeto donde la línea de proyección se cruza.

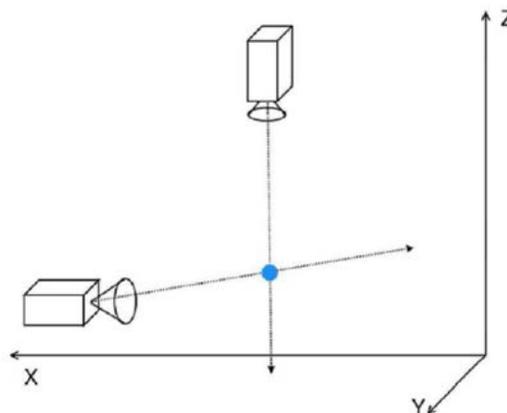


Figura 8 intersección de las líneas de enfoque en el espacio 3D.

La metodología asume que las cámaras están calibradas, y que conoce su posición y orientación en el sistema de referencia del mundo, lo cual resulta imprescindible

para deshacer correctamente la proyección. La representación de la extremidad mediante una estructura de alambre en 3D (figura 9) permite obtener información del movimiento, como pueden ser los ángulos que se forman por las articulaciones.

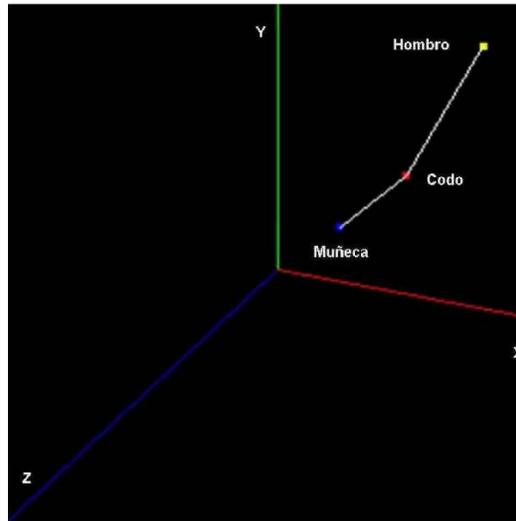


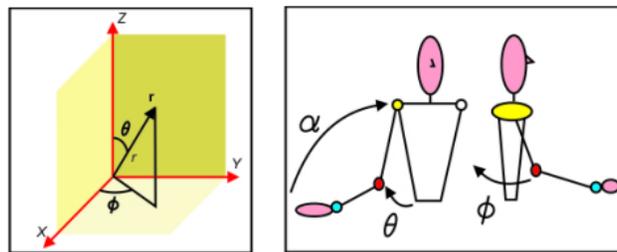
Figura 9 El brazo representado en el espacio 3D

Extracción de características

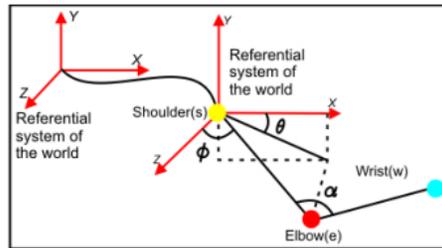
Cuando se han determinado los procesos de segmentación y seguimiento del brazo en el espacio tridimensional, lo siguiente por determinar son las características más convenientes para analizar el movimiento del brazo. Por lo general las características del movimiento se representan a través de la trayectoria que describe el objeto a seguir. No obstante, debido a que la extremidad está conformada por un conjunto de 3 objetos, es decir las articulaciones, si se utilizan las trayectorias para representar su movimiento esto originaría una sobrecarga de variables, volviendo complicado el manejo, pues se contaría con 3 variables (X, Y, Z) por cada articulación de la extremidad. Un método alternativo para modelar el movimiento del brazo es la representación de la postura en cada instante de tiempo a través de los ángulos entre las articulaciones y el torso del paciente. Un ángulo presenta la cualidad de que es invariante a las translaciones y al escalado, y también es independiente de las características físicas de la persona. Se proponen 3 grados de libertad para la representación de la postura del brazo. El primer ángulo (α) se forma entre el brazo y el antebrazo. Para el segundo y tercer ángulo (θ, Φ), se

considera la posición del brazo con respecto al torso. Tomando como punto de referencia al hombro y obteniendo las coordenadas esféricas del codo. Por lo tanto, el conjunto de características que describe la trayectoria del brazo al realizar los gestos está formada por $V = [\alpha - \theta - \phi]$.

En la figura 10 se puede ver la representación del movimiento, en figura 10a se tienen las coordenadas esféricas en un sistema cartesiano, la figura 10b muestra los 3 ángulos usados para representar el movimiento del brazo y en figura 10c se observan los ángulos con respecto al sistema de referencia.



a) Coordenadas esféricas. b) Ángulos usados.



c) ángulos con respecto al sistema de referencia.

Figura 10 Representación del movimiento.

Las coordenadas esféricas del codo son obtenidas usando las ecuaciones 1,2 y 3.

$$\rho = \sqrt{X_D^2 + Y_D^2 + Z_D^2} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Y_D}{X_D} \right) \quad (2)$$

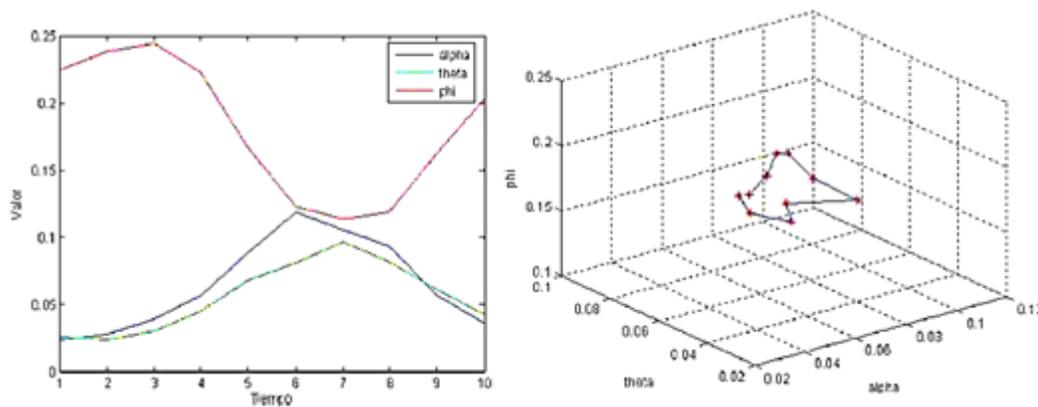
$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{Z_D}{\rho} \right) \quad (3)$$

Donde X_D, Y_D, Z_D son las coordenadas cartesianas del codo relativas a la posición del hombro. Los 3 ángulos son normalizados al dividirse entre 2π radianes. De esta forma se puede representar la trayectoria descrita por el movimiento del brazo al

realizar un gesto, bajo el sistema de coordenadas $\alpha - \theta - \phi$ como en la ecuación 4, donde n es la longitud de la trayectoria.

$$F = \{(\alpha_1^*, \theta_1^*, \phi_1^*), \dots, (\alpha_n^*, \theta_n^*, \phi_n^*)\} \quad (4)$$

La figura 11 muestra la trayectoria del movimiento del brazo al realizar el gesto circular en el espacio de características $\alpha - \theta - \phi$ así como la variación de los ángulos con respecto al tiempo.



a) Trayectoria del movimiento del brazo. b) Variación de los ángulos respecto al tiempo.

Figura 11 Trayectoria del gesto circular.

3. Resultados

Calibración de las cámaras

El método para calcular los parámetros intrínsecos de las cámaras se describió en la sección correspondiente en el apartado de metodología, los parámetros extrínsecos se obtienen de forma manual al medir la posición y orientación (Tabla 1), de la cámara con respecto a un punto de referencia del mundo, como se muestra en la figura 2.

Tabla 1 Posición y orientación de las cámaras.

Colocación de las cámaras	webcam 1	webcam 2
Posición en el eje X en metros	0.4	1.53
Posición en el eje Y en metros	0.3	0.05
Posición en el eje Z en metros	0.13	0.16
Rotación en el eje Y en grados	315	0
Rotación en el eje Z en grados	180	180

Durante la experimentación se tomó la esquina del soporte de madera que sujeta a las cámaras, como punto de referencia del mundo.

Segmentación

En esta etapa se utilizó la retroproyección de histograma. Cada histograma de color es extraído de las secuencias de fotogramas de las dos webcams por cada una de las articulaciones resaltadas con cintas de color. Un histograma de color de una articulación se compone del conteo de la cantidad de ocasiones en que una determinada mezcla de color HSV sobreviene en el fotograma. Se optimizó el rendimiento segmentando por cada canal de color a los histogramas en 32 intervalos de clase. En la tabla 2 se pueden observar el número de píxeles muestreados por cada color en la segmentación. En la figura 12 se observa la segmentación de cada una de las marcas de color.

Tabla 2 Numero de píxeles muestreados.

Color	Número total de píxeles muestreados
Marca color amarillo	15 000
Marca de color rojo	30 575
Marca de color azul	40 300



Figura 12 Resultados de algoritmo de retroproyección de histograma

Seguimiento 2D

Con base en las diversas pruebas realizadas para aplicar el algoritmo de seguimiento descrito en la metodología, se utilizó una ventana de 100 x 100 px para ejecutar el algoritmo ya que fue el tamaño que entregó los mejores resultados, pues así se reduce el ruido en el seguimiento originado por algunas regiones en la imagen semejantes al color a localizar, la posición de esta ventana se modificó con base en

el desplazamiento de las marcas. El uso de una ventana de seguimiento reduce el cálculo en el proceso de segmentación. Una consideración importante es la velocidad de movimiento, se observó en las pruebas que cuando el brazo se mueve muy rápido, el algoritmo pierde la pista de la marca. Hay que destacar que los movimientos durante una terapia de rehabilitación no son demasiado rápidos, el seguimiento no se pierde en desplazamientos moderados. En la figura 13 se puede observar el funcionamiento de Camshift en diversas imágenes por cada articulación. El color de la ropa se estableció para ayudar a una mejor delimitación de las regiones de interés (articulaciones).

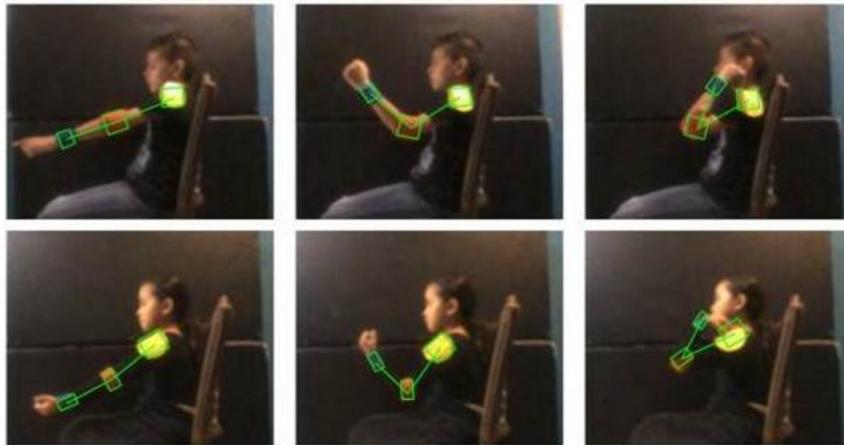


Figura 13 Secuencia que muestra la segmentación y seguimiento de cada marca de color.

Reconstrucción 3D

En esta fase se construye una representación digital del brazo de una persona, representándolo a través de un modelo de alambre en el espacio 3D, utilizando el cruce de las líneas de enfoque de las cámaras web. El seguimiento realizado en el espacio 2D de las imágenes de las dos webcams se emplea para aproximar la ubicación tridimensional de cada una de las articulaciones del brazo.

La experimentación demostró que una colocación perpendicular de las webcams origina oclusión completa en el brazo del individuo imposibilitando el seguimiento de las zonas de color, la colocación de las cámaras utilizada en este proyecto se ilustra en la figura 2. La disposición elegida aumenta el campo de visión del ejercicio a seguir, el usuario es libre de ejecutar los diversos gestos terapéuticos

adecuadamente. El usuario se coloca lateralmente frente a las cámaras y las cámaras se encuentran a 2.5 metros de distancia aproximadamente. En la tabla 3 se describe la colocación de las cámaras.

Tabla 3 Resultados en la etapa de reconstrucción tridimensional en centímetros.

X_e	Y_e	Z_e	X_r	Y_r	Z_r	Error
75	17	67	77	17	65	2.8
105	22	85	107	24	86	3
47	55	74	45	54	80	6.4
122	20	147	125	17	143	5.8
90	10	120	94	12	117	5.3
50	35	90	48	36	92	3

Para determinar la precisión de la etapa de reconstrucción tridimensional se efectuaron una serie de mediciones colocando el brazo del usuario en distintas posiciones conocidas y anotando la estimación de la posición de una marca de color dada por el sistema de seguimiento. Estas mediciones están resumidas en la tabla expresadas en centímetros, siendo X_e, Y_e, Z_e la posición estimada y X_r, Y_r, Z_r la posición real. La diferencia entre la posición real y la estimada demostró ser del orden de centímetros. La figura 14 ilustra la representación 3D del brazo de una persona.

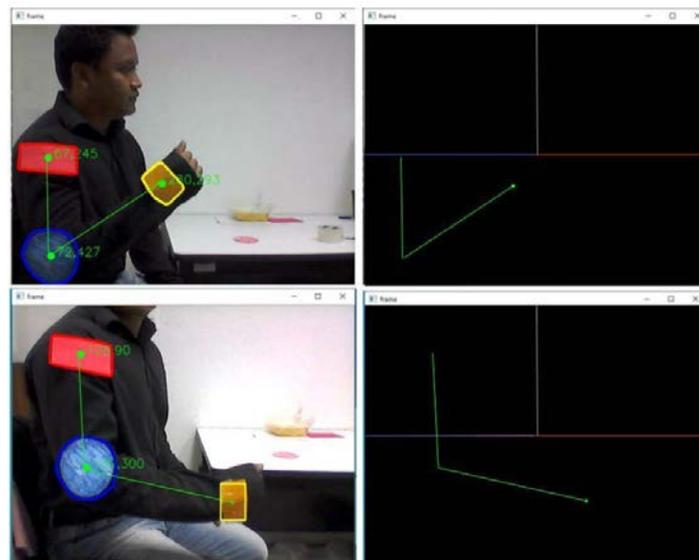


Figura 14 Seguimiento del brazo en el espacio tridimensional

El seguimiento bidimensional del movimiento de las articulaciones capturado por las webcams se ilustra en la primera columna de imágenes. La segunda columna contiene la representación tridimensional del miembro superior de una persona a través de un modelo digital de alambre, el cual enlaza tridimensionalmente las zonas de color mediante líneas. En la figura 15a se muestran las 3 trayectorias que corresponden a cada uno de los tres ángulos del movimiento circular del brazo de una persona sana, en la figura 15b se aprecia la gráfica generada en un espacio tridimensional por una sola trayectoria formada por la obtención de los 3 ángulos propuestos en este proyecto para representar el movimiento del brazo en 3D.

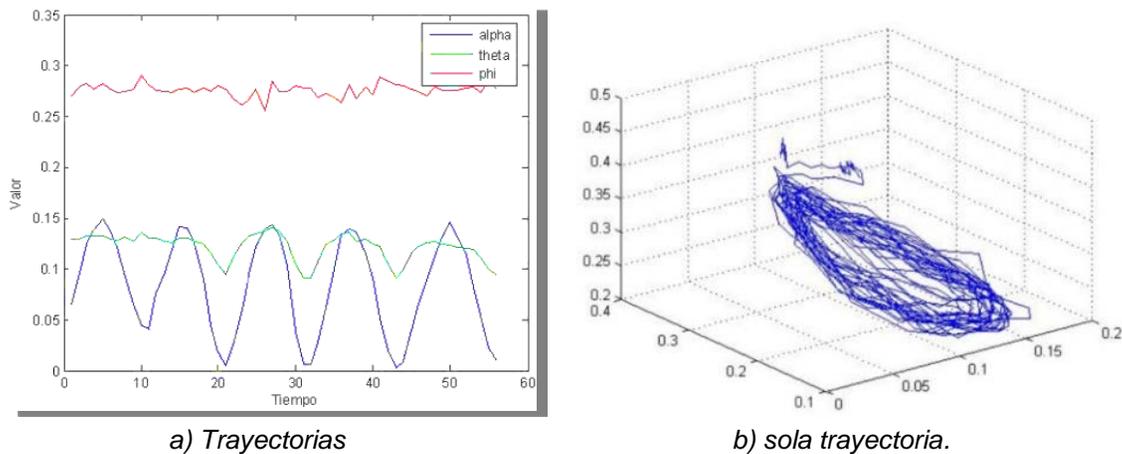


Figura 15 Trayectoria del gesto circular del brazo.

4. Discusión

Entre las áreas de oportunidad que presenta el sistema expuesto en este artículo se encuentran las que se mencionan a continuación:

- Profundizar en la investigación para determinar nuevas características las cuales permitan una representación cada vez más adecuada de la postura del brazo en tres dimensiones y entrenar modelos que permitan realizar una calificación del movimiento mediante la comparación de las trayectorias originadas por las características obtenidas en este proyecto.
- Investigación para incorporar nueva información al algoritmo de detección, como textura o bordes, lo que permitiría optimizarlos, generando una reconstrucción más integral de la extremidad en la escena. De esta manera

se reducen los problemas en la segmentación de regiones con similitud con la piel humana, al mismo tiempo que se evita pérdida en la detección cuando el miembro se aproxima al rostro.

- Generar un módulo que calibre automáticamente las cámaras de video para obtener los parámetros extrínsecos, disminuyendo con esto los problemas originados por la calibración manual.
- Aplicar diversas métricas basadas en modelos de probabilidad que favorezcan el análisis de las trayectorias de los gestos terapéuticos del miembro superior.

5. Conclusiones

El sistema presentado en este artículo demostró tener una importante efectividad para el seguimiento de los movimientos del brazo humano en tres dimensiones debido a la baja tasa de error encontrada en la etapa de reconstrucción, con un procesamiento de las imágenes de 16 cuadros por segundo. La implementación de este es poco costosa pues solo se necesitan de dos webcams, si se compara con otros sistemas de captura existentes en el mercado, estos necesitan de artefactos costosos y presentan una operatividad compleja. Cabe mencionar que las condiciones experimentales del segmentación y rastreo adecuado del miembro superior de la persona como se expusieron en este artículo permitieron mostrar la efectividad del desarrollo, lo que permite considerarlo para su implementación en otros campos como son las interfaces humanas – computadora, reconocimiento de gestos, simulación y videojuegos.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Alvarado, S., Martínez, M., Hernández, R., & Montero, J. A. (2019). Alternativa para la evaluación de gestos terapéuticos del brazo. Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Puebla 2019, 11(6), 35–39.
- [2] Barrera González, P., & Cañas, J. M. (2004). Seguimiento Tridimensional Usando Dos Cámaras. In Reports on systems and communications: Vol. IV

- (Issue 7). http://scholar.google.com/scholar?start=30&q=vicente+matellan&hl=en&as_sdt=2000#9.
- [3] Bradski, G. (1998). Computer vision face tracking as a component of a perceptual user interface. *Workshop on Applications of Computer Vision*, 1, 214–219.
- [4] Gómez-Allende, M. D. (1993). Reconocimiento de formas y vision artificial (Ra-Ma (ed.)). Addison-Wesley Iberoamericana.
- [5] Kim, H., Miller, L. M., Fedulow, I., Simkins, M., Abrams, G. M., Byl, N., & Rosen, J. (2013). Kinematic Data Analysis for Post-Stroke Patients Following Bilateral Versus Unilateral Rehabilitation With an Upper Limb Wearable Robotic System. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 21(2), 153–164. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2012.2207462>.
- [6] Kottke, F. J., & Lehmann, J. F. (1994). *Medicina Física Y Rehabilitación* (4th Ed.). Panamericana.
- [7] Michel-Vera, D., Hernandez Lopez, F., & Martin-Gonzalez, A. (2018). Reconocimiento de gestos dinámicos para la manipulación de imágenes. *Research in Computing Science*, 147, 229–239. <https://doi.org/10.13053/rcs-147-7-18>.
- [8] OpenCV. (2020). OpenCV Open-Source Computer Vision Library. <https://opencv.org/releases/>.
- [9] Ren, Y., Wu, Y.-N., Yang, C.-Y., Xu, T., Harvey, R. L., & Zhang, L.-Q. (2017). Developing a Wearable Ankle Rehabilitation Robotic Device for in-Bed Acute Stroke Rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(6), 589–596. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2584003>
- [10] Santos, L. F. d., Schmidt, H., Krüger, J., & Dohle, C. (2013). Visualization of virtual reality neurological motor rehabilitation of the upper limb — A systematic review. *2013 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*, 176–177. <https://doi.org/10.1109/ICVR.2013.6662113>.
- [11] Swain, M. J., & Ballard, D. H. (1991). Color indexing. *International Journal of Computer Vision*, 7(1), 11–32. <https://doi.org/10.1007/BF00130487>.