

REHABILITACIÓN DEL MIEMBRO SUPERIOR CON REALIDAD VIRTUAL Y MODELOS OCULTOS DE MARKOV

Ing. Samuel Alvarado Agama, Ing. Abraham Cantú González, Dra. Miriam Martínez Arroyo, Dr. Miriam Martínez Arroyo
Tecnológico Nacional de México/IT de Acapulco

México

sagama86@gmail.com

cgabraham18@gmail.com

miriamma_ds@hotmail.com

jamonero1@infinitummail.com

Resumen

El presente trabajo muestra los resultados en el desarrollo de una herramienta computacional capaz de estimular y evaluar gestos terapéuticos del brazo, utilizando realidad virtual para su uso en el hogar. Desarrollando para esto, entornos virtuales inmersivos y un sistema visual para rastrear el brazo de una persona, que sirva como entrada a modelos ocultos de Markov (MOM) que reconozcan los gestos aplicando una medida de similitud probabilista. Se busca que el sistema al menos analice tres gestos terapéuticos: flexión, circular y abducción, actualmente el Sistema se encuentra en la etapa de Desarrollo de los escenarios virtuales y probando técnicas de clasificación para la evaluación del progreso del paciente.

Palabras clave—realidad virtual, modelos ocultos de Markov, rehabilitación motriz, miembro superior, terapia

REHABILITATION OF THE SUPERIOR MEMBER WITH VIRTUAL REALITY AND HIDDEN MARKOV MODELS.

Abstract.

The present work shows the results in the development of a computational tool capable of stimulating and evaluating therapeutic arm gestures, using virtual reality for use at home. Developing for this, immersive virtual environments and a visual system to track a person's arm, which serves as an input to hidden Markov models (MOM) that recognize gestures applying a measure of probabilistic similarity. The system is intended to analyze at least three therapeutic gestures: flexion, circular and abduction. Currently, the system is in the development stage of virtual scenarios and testing classification techniques for evaluating patient progress.

INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud más de mil millones de personas viven en todo el mundo con alguna forma de discapacidad; de ellas, casi 200 millones experimentan dificultades considerables en su funcionamiento [1]. La prevalencia de la discapacidad en México para 2016 fue de 6%, según los datos de la ENADID 2016. Esto significa que 7.1 millones de habitantes del país no pueden o tienen mucha dificultad para hacer alguna de las ocho actividades evaluadas:

caminar, subir o bajar usando sus piernas; ver (aunque use lentes); mover o usar sus brazos o manos; aprender, recordar o concentrarse; escuchar (aunque use aparato auditivo); bañarse, vestirse o comer; hablar o comunicarse; y problemas emocionales o mentales [2].

En 2016, del total de discapacidades reportadas el 33% pertenece a dificultad para mover o usar brazos o manos [2]. Una de las principales causas es el Evento Vascular Cerebral. En México según la base de datos de egresos hospitalarios del año 2016 del sector salud (Secretaría de Salud, IMSS, IMSS Oportunidades, ISSSTE, PEMEX, SEMAR y SEDENA) se registraron 5,314,132 egresos del sector público sanitario. De éstos, 46,247 (0.9%) fueron registros de Enfermedad Vascular Cerebral aguda.[3].Las secuelas de un Enfermedad Vascular Cerebral tardan mucho tiempo en curarse lo cual se convierte en algo muy costoso y devastador en los países subdesarrollados y para las personas con recursos económicos limitados.

Según el diagnóstico sobre la situación de las personas con discapacidad en México, el 54% de las personas con discapacidad motriz se encuentran en situación de pobreza.[2]. Es por esto por lo que se requieren nuevas opciones terapéuticas para disminuir la necesidad de que el paciente permanezca en el hospital durante un largo período de tiempo.

Recientemente se han desarrollado nuevas opciones terapéuticas para que los pacientes puedan continuar su terapia de rehabilitación motriz en casa, sin la necesidad de un terapeuta presente todo el tiempo. En este caso, existe la necesidad de un sistema que pueda estimular y evaluar el progreso del paciente otorgando retroalimentación. Se propone construir una herramienta que estimule el desarrollo de ejercicios terapéuticos en el paciente mediante realidad virtual inmersiva y que evalúe estos gestos funcionales durante la rehabilitación como una forma de proporcionar retroalimentación objetiva y automática al paciente.

MARCO TEÓRICO

Rehabilitación virtual

Los paradigmas de rehabilitación se han visto influenciados por los avances tecnológicos, emergiendo el uso de videoconsolas como una opción real para el proceso de rehabilitación de personas en situación de discapacidad. Estos dispositivos son capaces de proporcionar un entorno simulado, similar a situaciones de la vida real, donde las personas tienen la oportunidad de olvidarse de su entorno y de la situación en que

se encuentran y centrarse directamente en una tarea en la simulación del medio ambiente [4]. De acuerdo con esto, la Rehabilitación Virtual (RHV) se comprenderá como el entrenamiento basado en ejercicios de simulación mediante tecnología de realidad virtual. Hoy en día la RHV, es una técnica ampliamente utilizada a nivel internacional, que arroja muy buenos resultados en variadas patologías traumáticas y neurológicas en los diferentes grupos etarios [5].

Actualmente, la Terapia Ocupacional ha incluido la RHV como herramienta de rehabilitación, tanto para generar cambios en el desempeño global del ser humano, como para entrenar habilidades motoras específicas, la cual es llevada a cabo en entornos simulados a través del uso de consolas, permitiendo practicar y probar habilidades y movimientos sin ocasionar daños. Así, la conceptualización de la Rehabilitación Virtual estará definida como el entrenamiento basado en ejercicios de simulación mediante tecnología de realidad virtual[6].

Ventajas de la realidad virtual en la terapia ocupacional

Aunque este tipo de terapia innovadora tiene poco tiempo con relación a las terapias tradicionales, existen estudios que demuestran resultados positivos y mejorías clínicas, por ejemplo, “en el empleo de sistemas de realidad virtual sobre la extremidad superior en niños con parálisis cerebral.

Algunas de las ventajas más destacadas de la realidad virtual son las siguientes:

Posee la capacidad de graduar los estímulos desde simples a complejos.

Tiene la capacidad de registrar el progreso del niño.

Garantiza un ambiente seguro de aprendizaje.

Ofrece un tratamiento individualizado, según el diagnóstico y las necesidades del niño.

- La influencia en la motivación del niño a través de la posibilidad de incluir el juego en el proceso de rehabilitación.

Permite un número de repeticiones diarias dirigidas a los déficits específicos del niño para producir cambios y optimizar el aprendizaje

Movimiento de los brazos

Frederic J. Kottke, clasifica los movimientos articulares presentes en el tronco y brazo de la siguiente manera [7]

Flexión: son los movimientos dados entre dos segmentos adyacentes que se acercan disminuyendo el ángulo entre ellos.

Extensión; son movimientos dados entre dos segmentos adyacentes que se alejan aumentando el ángulo entre ellos.

Rotación; son los movimientos o giros de un segmento alrededor de su eje.

Aducción; son los movimientos laterales que hacen que un segmento se acerque a la línea media del cuerpo.

Abducción; son los movimientos laterales que hacen que un segmento se acerque a la línea media del cuerpo.

Desviación; son los movimientos que alejan un segmento de la posición de partida.

Pronación; es la rotación del antebrazo que hace que la palma de la mano esté hacia arriba.

Supinación; es la rotación del antebrazo que hace que la palma de la mano esté hacia arriba.

Por otro lado, el autor Claudio H. Taboada[8] menciona los límites que tiene cada articulación y los arcos de movimiento de las articulaciones. . “A la cantidad de movimiento expresada en grados que presenta una articulación en cada uno de los tres planos del espacio, se le llama rango de movimiento (RdM). Los valores de RdM normales, según la asociación para el estudio de la Osteosíntesis

Referencia anatómica	Articulaciones	Movimiento	RdM min / max
Brazo	Hombro (Glenohumeral)	Flexión	0° / 150° - 170°
		Extensión	0° / 40°
		Abducción	0° / 160° - 180°
		Aducción	0° / 30°
		Rotación externa	0° / 70°
		Rotación interna	0° / 70°
Antebrazo	Codo	Flexión	0° / 150°
		Extensión	0° / 10°
	Radio cubital próxima y radio cubital distal	Pronación	0° / 90°
		Supinación	0° / 90°
Mano	Muñeca	Flexión	0° / 50° - 60°
		Extensión	0° / 35° - 60°
		Desviación radial	0° / 25° - 30°
		Desviación cubital	0° / 30° - 40°

Tabla 14 "Grados de movimientos propios de las extremidades superiores del cuerpo. Fuente [2]"

Sistemas de captura de movimiento

La captura de movimiento es una técnica para digitalizar movimientos reales. Estos sistemas son utilizados para adquirir las características del movimiento de un ser humano con un grado de precisión relativamente alto.

Pueden clasificarse según su tecnología en: electromecánicos, electromagnéticos, inerciales y ópticos. La clasificación se ilustra en la Figura 1.

Los sistemas ópticos de captura de movimiento son los más utilizados en laboratorios de biomecánica por su alta fidelidad y bajo costo de implementación al poder funcionar con cámaras web y se pueden clasificar como sistemas ópticos sin marcadores y con marcadores, estos a su vez se dividen en: activos y pasivos.

En los sistemas ópticos con marcadores pasivos, se colocan al sujeto marcadores reflectantes en todos los puntos de interés de captura de movimiento, a diferencia de los sistemas ópticos activos, donde se colocan marcadores activos (diodos emisores de luz [LED]).

En los sistemas ópticos con marcadores pasivos, se colocan al sujeto marcadores reflectantes en todos los puntos de interés de captura de movimiento, a diferencia de los sistemas ópticos activos, donde se colocan marcadores activos (diodos emisores de luz [LED]). Una desventaja en los sistemas ópticos con marcadores es la oclusión; aquí los marcadores no aparecen en varias tomas de la cámara, debido a la obstrucción de la línea de visión de los objetos de la escena o por otras partes del cuerpo del sujeto. La mayoría de los paquetes de post procesamiento comerciales tienen la capacidad de tratar con los marcadores ocluidos; para ello se crean marcadores virtuales para sustituir la información de los ocluidos, o pueden usar marcadores redundantes (más que el mínimo requerido en el protocolo estándar), para compensar los marcadores ocluidos.

El movimiento de los marcadores se suele utilizar para deducir el movimiento relativo entre dos segmentos consecutivos, con el objetivo de definir con precisión el movimiento de una articulación. El movimiento de la piel (donde se coloca el marcador), en relación con el hueso subyacente, es el principal factor que limita la aplicación de algunos sensores.[9][10].

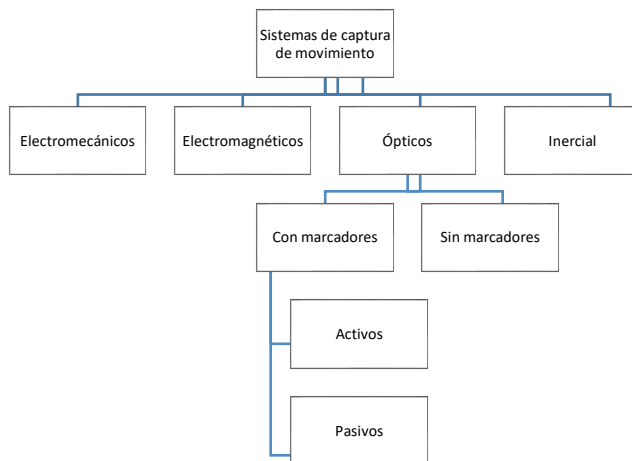


Figura: 1. Clasificación de sistemas de captura de movimiento [7].

Los sistemas de captura de movimiento sin marcadores, como la cámara Microsoft Kinect y Organic Motion™, ofrecen una alternativa distinta a la tecnología de captura de movimiento[11]. El Kinect es una cámara capaz de estimar la geometría 3D de la escena adquirida, a 30 cuadros por segundo; está construida con un sensor de profundidad de resolución espacial de 640×480 píxeles, una videocámara VGA de la

misma resolución y un arreglo de micrófonos para reconocimiento de voz.

El Kinect fue desarrollado como un dispositivo periférico para uso con la consola de juegos Xbox 360, aunque se ha adaptado fácilmente para otros campos como: la robótica, seguimiento del esqueleto humano, reconstrucción 3D, terapia asistencial y biomecánica.

Comparación de métodos de seguimiento humano.

Se revisaron diferentes técnicas para la obtención del movimiento humano. Los sistemas basados en sensores se dividen en inerciales, ópticos y mixtos. Los inerciales obtienen la posición del cuerpo humano en el tiempo utilizando acelerómetros y giroscopios. Los ópticos, emiten luz infrarroja que es detectada por unas cámaras para determinar su posición. Los ópticos, no pueden medir la aceleración y los cambios bruscos de dirección y los inerciales tienen carencias al obtener la posición en el espacio. Existen sistemas que utilizan sensores inerciales y ópticos para evitar las deficiencias de ambos[12].

Los sistemas de visión con marcas se benefician de las articulaciones del cuerpo humano para poder detectar su forma al colocarle marcas en dichas articulaciones, estas marcas pueden ser activas, pasivas o mixtas. Las marcas eliminan el problema de la segmentación, pero ocasionan que se pierda a la persona o alguna de sus extremidades por el problema de oclusión. Esta técnica funciona adecuadamente usando solo webcams.

Los sistemas de visión sin marcas no tienen el problema de oclusión, ya que la mayoría se basa en detectar al cuerpo humano por medio de delimitar su estructura antes de la detección, como lo son los BLOBS⁵⁴ o manchas y que definen la cabeza, las extremidades, el tronco y las manos y los pies, y los stick que determinan la estructura en forma de alambre del cuerpo humano. En esta categoría destaca la tecnología Kinect. Los estudios para determinar la resolución espacial del Kinect en las coordenadas X, Y, Z, evidencian que el error asociado a la medición de las coordenadas cartesianas aumenta a medida que el sujeto de análisis se aleja del sensor (escala logarítmica), obteniendo valores mínimos y máximos de: 1 mm hasta 6.5 mm para las coordenadas X e Y; y 2mm hasta 5cm en la coordenada Z, para valores de distancia del sujeto de estudio al sensor de 0.8 m hasta 4m respectivamente.

Las desviaciones en la medida de las coordenadas son considerables frente a la presencia de fuentes parásitas infrarrojas, por tal motivo es necesario realizar un adecuado control de estas.

El sistema de captura de movimiento con Kinect es de bajo costo y fácil instalación y se presenta como una opción para realizar un estudio preliminar de los parámetros cinemática de la marcha humana. Sin embargo, el análisis de los datos de validación indica que el sensor Kinect no se puede emplear para hacer un análisis de movimiento humano preciso.[13].

En el presente trabajo se desea realizar un seguimiento del movimiento humano utilizando una técnica que nos permita

cambiar de ambiente, ya que el sistema, tiene como meta ser utilizado en los hogares de los pacientes en rehabilitación.

Además, se necesita que sea fácil de implementar y que sea muy económico. No se necesita que sea de precisión milimétrica. Por los requisitos deseados, la técnica que más se adecúa a las necesidades del proyecto es la utilización de seguimiento visual con marcas del movimiento utilizando webcams[12].

Métricas.

Una vez obtenido el movimiento humano, este puede ser representado como una trayectoria, en donde las coordenadas cartesianas del objeto obtenidas en cada cuadro de video forman una curva temporal. El objetivo de esta propuesta es obtener evaluaciones de ejercicios terapéuticos. Al ver los movimientos como trayectorias abre la posibilidad de comparar los ejercicios realizados, con ejercicios ya establecidos como correctos.

Al analizar la viabilidad de diversas métricas de distancia, estas presentan varias restricciones, como son igual duración e igual número de muestra de cuadros por unidad de tiempo. Por lo tanto, se necesita de una técnica que no tenga estas restricciones. A continuación, se describe como los Modelos Ocultos de Markov pueden resolver estos problemas.

Modelos Ocultos de Markov

Un Modelo Oculto de Markov (MOM) es un modelo estadístico en el que se asume que el sistema a modelar es un proceso de Markov de parámetros desconocidos. El objetivo es determinar los parámetros desconocidos (u ocultos) de dicha cadena a partir de los parámetros observables.

Los MOM son herramientas útiles para modelar series de datos en el tiempo. Existen tres problemas básicos para que los MOM puedan ser aplicados en el mundo real: a) evaluación, que determina la probabilidad de la secuencia de observaciones dado el modelo, b) decodificación, que consiste en encontrar la secuencia de estados más probable que haya generado una secuencia de observaciones dada, y c) entrenamiento, que consiste en ajustar los parámetros del MOM para maximizar la probabilidad dada una secuencia de observaciones y el modelo. Si los MOM son vistos como grafos dirigidos, entonces se pueden definir diferentes topologías: ergódicas, que representan a los grafos completamente conectados; Bakis, grafos conectados de izquierda a derecha e izquierda-derecha paralelas, grafos conectados de izquierda a derecha en paralelo. Como los MOM pueden representar la dinámica de un proceso, es fácil representar una trayectoria como un MOM. Actualmente existen diferentes métodos para comparar MOM's. El primer método es el propuesto por Levinson, que se basa principalmente en comparar la matriz de observaciones, de esta forma se comparan los modelos por la similitud de sus probabilidades por generar observaciones en cada uno de los estados.

La distancia de Kullback-Leibler, es una buena aproximación para comparar dos MOM, ya que considera todos los parámetros de un MOM; está basada en los conceptos de la divergencia, entropía cruzada, o información de discriminación. Un problema de esta distancia es la

convergencia, debido a que depende de la longitud de la secuencia de observaciones generada por el modelo.

Porikli, diseña una distancia para comparar trayectorias de movimiento de objetos, donde la información de la trayectoria se reemplaza por los símbolos de observación del modelo, y los estados capturan las propiedades espacio - temporales de la trayectoria.

Sin embargo, se requiere un modelo por cada trayectoria individual, lo que hace complicado modelar varias trayectorias de una misma clase

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema propuesto consiste en la simulación de 2 entornos virtuales para ejercitación terapéutica del miembro superior con fines de rehabilitación, usando para tal fin las gafas de realidad virtual inmersiva Oculus Go y la plataforma de realidad virtual Unity, lo cual favorece el desarrollo de escenarios que aumenten la motivación en el paciente y representa un medio seguro para el desarrollo de las terapias de rehabilitación, adicionalmente un módulo de calificación de los gestos del brazo usando modelos ocultos de Markov.

Para la calificación de un ejercicio terapéutico se propone el desarrollo de una herramienta capaz de rastrear las características del ejercicio. En este caso son necesarias los ángulos en el tiempo del movimiento del brazo humano al realizar el ejercicio. La obtención de los ángulos es mediante las posiciones en el espacio de las articulaciones del brazo humano en el tiempo. Un seguidor visual con marcas utilizando dos Webcams permite la obtención de las posiciones de las articulaciones. El seguimiento de las marcas es gracias a un segmentador y un seguidor 2D que ayude a predecir la posición de las marcas en el siguiente cuadro. Una vez obtenidas en cada una de las dos webcams, las posiciones en dos dimensiones de las marcas, es decir de las articulaciones, es necesario construir una representación en tres dimensiones. Para la reconstrucción 3D, se necesitan los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras.

El paso siguiente es el entrenamiento de los modelos ocultos de Markov que se ocuparan de generar valores de similitud entre la realización de los ejercicios y los ejercicios bien hechos. Para su entrenamiento se utilizan secuencias de ejercicios bien ejecutados. Como al realizar el ejercicio los datos de las posiciones de las articulaciones del brazo son continuos, se necesita realizar un proceso de discretización de los datos.

El módulo de entornos virtuales cuenta con dos escenarios de 3 niveles cada uno, el primer escenario es una actividad de disparar a unos bloques el cual involucra el movimiento de flexión del brazo, el paciente puede avanzar de nivel al derribar todos los bloques que se le presenten en el escenario como lo muestra la figura 2, cada nivel de dificultad tendrá los bloques un poco más altos que los anteriores para ir aumentando la intensidad de la terapia[14].

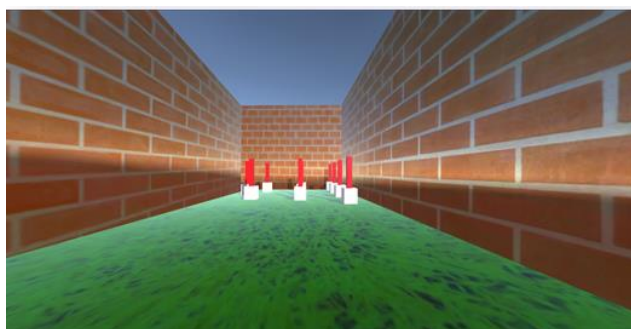


Figura: 2 Escenario para derribar los bloques, primer nivel

La segunda actividad está relacionada con una tarea del hogar, en este caso para que el paciente aprenda a preparar su alimento (una hamburguesa), el escenario es una cocina como la que se muestra en la figura 3, en la que el paciente debe seleccionar los ingredientes y los utensilios necesarios para preparar su hamburguesa. Para aumentar el nivel de dificultad el paciente debe desinfectar su verdura y hacer uso de un cuchillo con el cual debe picar sus verduras para la preparación de su alimento y en el nivel avanzado, el paciente debe buscar sus ingredientes, desinfectarlo y picarlos para poder preparar su alimento, al finalizar deberá servirlo en un plato y lavar todos los utensilios utilizados y dejarlos en su lugar.



Figura: 3 Actividad del hogar, preparar alimento, nivel 1

Ambos escenarios fueron creados con la herramienta de *sketchup* y exportados en un formato soportado por el motor de videojuegos Unity, programando dicho motor en lenguaje C# y compilando de tal manera que los escenarios sean compatibles con Android ya que es el sistema que viene integrado en las gafas de Oculus Go, para el desarrollo del módulo de evaluación se utilizó el software libre Python

RESULTADOS

Actualmente el sistema sigue en etapa de desarrollo y pruebas, con las cuales se sigue mejorando gracias a la experimentación para tener un sistema que sea preciso a la hora de estimular y evaluar los movimientos funcionales del paciente, en las figuras 4, 5, 6 y 7, se pueden observar algunas de las pruebas realizadas a ambos escenarios y al sistema de evaluación, teniendo una retroalimentación con el usuario para poder realizar las

correcciones necesarias y así lograr un software agradable y fácil de usar por el usuario.

Como resultados a alcanzar se desea tener el historial de la evaluación del paciente para saber cuánto ha sido su avance



Figura: 4 Prueba del primer escenario virtual por un menor de 5 años edad



Figura: 5 Prueba del segundo escenario virtual por una menor de 7 años de edad



Figura: 6 Prueba del sistema de evaluación a través de marcas en el brazo del menor

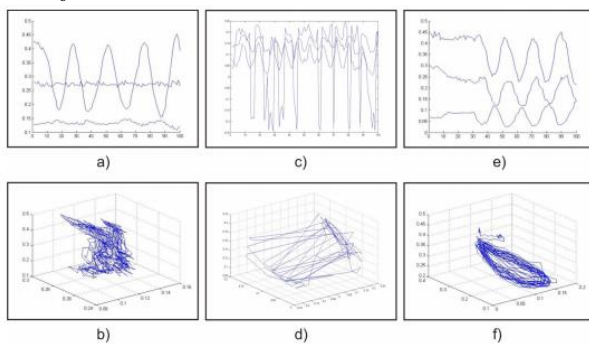


Figura: 7. Gráficos que muestran el movimiento del brazo a partir de la obtención de los ángulos generados por el movimiento del brazo del paciente.

REFERENCIAS

- [1] O. M. de la S. (OMS), “Informe mundial sobre discapacidad”, *Rehabil. Basada en la Comunidad Guías para la RBC*, 2011.
- [2] Secretaría de Desarrollo Social, “Diagnóstico sobre la situación de las personas con discapacidad en México”, *An. Sist. Sanit. Navar.*, p. 84, 2016.
- [3] E. Chiquete *et al.*, “Egresos por enfermedad vascular cerebral aguda en instituciones públicas del sector salud de México: Un análisis de 5.3 millones de hospitalizaciones en 2010”, *Rev. Mex. Neurocienc.*, vol. 13, núm. 5, pp. 252–258, 2012.
- [4] M. T. Schultheis, J. Himelstein, y A. A. Rizzo, “Virtual reality and neuropsychology upgrading the current tools”, *J. of Head Trauma Rehabilitation*, vol. 5, núm. 17, pp. 378–394, 2002.
- [5] M. Bayon y J. Martínez, “Virtual reality-based stroke rehabilitation”, *Rehabilitacion*, vol. 44, núm. 3, pp. 256–260, 2010.
- [6] R. Llorens, “Realidad virtual en rehabilitación”, *Presentación Jornada sobre daño cerebral adquirido*, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.imserso.es/>.
- [7] F. J. KOTTKE y J. F. LEHMANN, *MEDICINA FÍSICA Y REHABILITACIÓN*, 4a ed. MADRID: PANAMERICANA, 1994.
- [8] C. H. Taboadela, *Goniometría : una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales*, 1a ed. Buenos Aires: Asociart Art, 2007.
- [9] A. Cappozzo, A. Cappello, U. d. Croce, y F. Pensalfini, “Surface-marker cluster design criteria for 3-d bone movement reconstruction”, *Biomedical Engineering*, 1997.
- [10] J. P. Holden, K. L. S. J. A. Orsini, T. M. Kepple, L. H. Gerber, y S. J. Stanhope, “Surface movement errors in shank kinematics and knee kinetics during gait”, *Gait Posture*, vol. 5, núm. 3, pp. 217–227, 1997.
- [11] C. D. Mutto, P. Zanuttigh, y G. M. Cortelazzo, “Time-of-Flight Cameras and Microsoft Kinect(TM)”, *Springer Publishing Company*, 2012.
- [12] S. Alvarado, M. Martínez, R. Hernández, y J. A. Montero, “ALTERNATIVA PARA LA EVALUACIÓN DE GESTOS TERAPÉUTICOS DEL BRAZO”, *Congr. Int. Investig. Acad. Journals Puebla 2019*, vol. 11, núm. 6, pp. 35–39, 2019.
- [13] D. A. Bravo M., C. F. Rengifo R., y W. Agredo R., “Comparación de dos Sistemas de Captura de Movimiento por medio de las Trayectorias Articulares de Marcha”, *Rev. Mex. Ing. Biomed.*, vol. 37, núm. 2, pp. 149–160, 2016.
- [14] A. Cantu, M. Martínez, A. Montero Valverde, y F. Gazga Portillo, “Propuesta de realidad virtual para ayudar en la rehabilitación de personas con discapacidad motriz”, vol. 11, núm. 6, pp. 265–269, 2019.