

**ARTÍCULO ORIGINAL**

Validación de movimientos de coordinación en extremidades superiores para rehabilitación virtual usando pendientes lineales

**Validation coordinating movements in upper limbs for virtual rehabilitation using using slopes**

**Lic. Jorge Diego Mendoza,<sup>I</sup> M. C. J. Alberto Márquez Domínguez,<sup>II</sup> M. C. Beatriz A. Sabino Moxo,<sup>III</sup> M.C. Miguel Angel Sánchez Acevedo,<sup>IV</sup> M.C. Fidencio Servín Juárez<sup>V</sup>**

I Licenciado en Informática, Universidad de la Cañada, Teotitlán de Flores Magón, Oaxaca, México. E-mail: [jdiegomendoza14@unca.edu.mx](mailto:jdiegomendoza14@unca.edu.mx)

II Maestro en Ciencias de la Computación. Universidad de la Cañada. E-mail: [albertomarquez@unca.edu.mx](mailto:albertomarquez@unca.edu.mx)

III Maestro en Ciencias de la Computación. Universidad de la Cañada. E-mail: [beatriz\\_sabino@unca.edu.mx](mailto:beatriz_sabino@unca.edu.mx)

IV Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica. Universidad de la Cañada. E-mail: [masanchez@unca.edu.mx](mailto:masanchez@unca.edu.mx)

V Maestro en Ciencias en Sistemas Computacionales. Universidad de la Sierra Juárez. E-mail: [fservin@unsij.edu.mx](mailto:fservin@unsij.edu.mx)

---

**RESUMEN**

El desarrollo del presente trabajo se fundamenta en la importancia de apoyar los tratamientos de Rehabilitación Motriz por medio de Tecnología Informática para beneficio de los pacientes y especialistas del área. De acuerdo a un análisis realizado de las tecnologías existentes para la Rehabilitación Motriz, se ha identificado una serie de inconvenientes que limitan su uso en algunos tratamientos y por consecuencia los pacientes no continúan o no finalizan sus terapias, en este trabajo se propone emplear una herramienta de bajo costo (sensor Microsoft Kinect) que apoye en la captura de movimientos de los puntos clave de las extremidades superiores (manos, codos y hombros) usando pendientes lineales. Así mismo, se han realizado una serie de pruebas a 21 usuarios, en donde se evaluaron sus movimientos mediante umbrales que determinaron si un ejercicio fue realizado correctamente.

**Palabras clave:** interfaces naturales de usuario, pendientes lineales, sensor Kinect.

---

## **ABSTRACT**

The development of this research is based on supporting Motor Rehabilitation treatments using Information Technology for the benefit of patients and specialists in the area. According to an analysis of current technologies for Motor Rehabilitation, we have identified some disadvantages that limit their use in the treatment and therefore patients do not continue or complete their therapies, this study intends to use a tool low cost (Microsoft Kinect sensor) to support the motion capture of the key points of the upper extremities (hands, elbows and shoulders) using a slopes. Also, the tests were conducted with 21 users, the algorithm evaluated some movements, the thresholds used determined the correct exercises.

**Key words:** natural user interface, slopes, sensor Kinect.

---

## **INTRODUCCIÓN**

La Rehabilitación Motriz (RM) es una especialidad dentro de la medicina que comprende el diagnóstico, evaluación, prevención y tratamiento de déficits o incapacidades, con el objetivo de proporcionar, conservar o restituir la funcionalidad y autonomía al nivel más óptimo posible.<sup>1</sup>

Así mismo, la RM busca mejorar las funciones que se han perdido o se han visto disminuidas a causa de alguna lesión o patología.<sup>2,3</sup> El éxito de las técnicas que se aplican se determina por tres factores: la intervención temprana, la realización de ejercicios orientados a la ejecución de tareas y la frecuencia e intensidad con que éstos se realicen.<sup>4,5</sup>

También, como resultado de investigaciones médicas, se ha identificado que un proceso de RM puede llevarse a cabo por diferentes circunstancias,<sup>6</sup> en la figura 1 se mencionan algunas de las enfermedades y lesiones involucradas que pueden ocasionar discapacidad motriz:



**Fig. 1.** Principales casos para emprender un proceso de RM

Cuando las personas padecen de alguna de las enfermedades o lesiones anteriores, se ven en la necesidad de buscar soluciones fisioterapéuticas a sus padecimientos, por lo que emprenden un proceso que mejore su sistema músculo esquelético, mismo que debe desarrollarse de forma dirigida y coordinada por un especialista para que el paciente pueda tener de manera integrada las respuestas y soluciones a sus padecimientos.

Antes de llevar a cabo dicho proceso, es necesario que los especialistas identifiquen el segmento del cuerpo lesionado para especificar qué tipo de ejercicios físicos requieren los pacientes y de esta manera obtener resultados favorables en el tratamiento.

Por lo anterior, se citan algunos ejercicios físicos requeridos (Tabla 1) que se deben de llevar a cabo de manera continua cuando se daña alguna de las extremidades del cuerpo humano.<sup>7,8,9,10</sup>

**Tabla 1.** Ejercicios requeridos para RM con métodos tradicionales

Objetivo	Ejercicio requerido
Mejorar la respiración.	Aumentar la movilidad de la caja torácica. Aumentar el volumen respiratorio (cantidad de aire en los pulmones). Disminuir la frecuencia respiratoria. Mejorar el control del habla.
Disminuir la rigidez.	Aumentar la flexibilidad. Aliviar el dolor articular. Combatir los calambres.
Mejorar la postura.	Mejorar y prevenir contracturas y deformidades. Mejorar y prevenir la pérdida de equilibrio. Corregir la postura y así modificar su centro de gravedad.
Mejorar el equilibrio.	Mantener estabilidad del cuerpo.
Mejorar la coordinación.	Mejorar el movimiento adecuado de los pies y brazos.
Facilitar la marcha.	Caminar correctamente. Mejorar la deambulación (equilibrio y coordinación). Mejorar los cambios de dirección durante la marcha. Superar los bloqueos que se producen al pasar por lugares estrechos.
Facilitar los cambios de posición.	Mejorar el desplazamiento lateral en la cama.

Se han desarrollado una serie de herramientas tecnológicas de apoyo para la validación de rutinas de ejercicios de los pacientes y de esta forma puedan ellos mejorar de manera continua la movilidad de sus extremidades dañadas.

Diversos trabajos de investigación se han propuesto para contribuir en el proceso de RM, mismos que contemplan diferentes tipos de ejercicios físicos que mejoren el equilibrio<sup>11,12,13</sup>, coordinación<sup>2,11,14</sup>, entre otros. En seguida se describen algunas propuestas de investigación relacionadas con la rehabilitación de extremidades superiores:

**Toyra:** es un sistema desarrollado por la empresa Indra, combina la realidad virtual y la captación del movimiento en tiempo real para la rehabilitación motriz de miembros superiores (hombro, brazo, antebrazo y mano). Esta herramienta

umenta la motivación del individuo hacia su tratamiento y posibilita la medición objetiva y conocimiento del estado real del paciente y su avance.<sup>15</sup>

**Phantom-Omni:** Dispositivo desarrollado por la empresa SensAble Technologies, se compone de una base giratoria que está unida a un grupo de brazos mecánicos en cuya extremidad se integra el efector final que se asemeja a un lápiz, éste permite al usuario indicar la posición y orientación 2D del cursor háptico dentro del mundo virtual.<sup>20</sup>

Actualmente, con el uso de este dispositivo se han desarrollado prototipos de software en 2D para ejercicios de las extremidades superiores, por ejemplo guiar un anillo a lo largo de una trayectoria curvilínea entre "Inicio" y "Fin". Para esto se obtienen las coordenadas X,Y del dispositivo háptico, dicha posición será el centro del anillo, se verifica si se acerca mucho a la trayectoria o se sale de la misma, este cambia de color y se presentan los mensajes: Muy bien!, Cuidado!, o Anillo fuera de la trayectoria.<sup>14</sup>

**Terapia de Gestos (Gesture Therapy):** es una plataforma de realidad virtual para la rehabilitación motriz de las extremidades superiores (Fig. 2) el cual enmascara los movimientos repetitivos de la terapia en sencillos juegos de computadora que simulan tareas reales de la vida diaria.<sup>2</sup>

**Armeo:** Es un sistema de rehabilitación para miembros superiores, tiene un área de trabajo tridimensional que permite realizar ejercicios terapéuticos funcionales en un entorno de realidad virtual. ARMEO fomenta los movimientos de los brazos por medio de tareas específicas o diversos juegos en una pantalla de computadora, facilita el aprendizaje al tiempo que suministra de manera inmediata la información sobre el rendimiento de dichas prácticas. Un sensor que permite un entrenamiento combinado de la función de la mano y el brazo, pudiendo utilizarse también como un ratón de computadora para un software o videojuego estándar.<sup>16</sup>

**VirtualRehab:** Sistema de rehabilitación virtual que combina entornos 3D y tecnología Kinect (Microsoft®). Mediante este sistema de captura de movimiento, dirigido a pacientes con esclerosis múltiple. Esta herramienta dispone de un módulo de análisis e informes que permite al terapeuta hacer un seguimiento del progreso de cada usuario por medio de gráficos detallados e individualizados.<sup>17</sup>

**Framework para la Rehabilitación Física en Miembros Superiores con Realidad Virtual:** En este trabajo se presenta un Framework para la rehabilitación física de las extremidades superiores en pacientes entre 6 y 12 años de edad, basado en realidad virtual utilizando el sensor Microsoft Kinect. Dicha propuesta se fundamenta en la creación de una arquitectura de hardware y software, donde se ejecuta un conjunto de videojuegos que estimulan actividades físicas particulares, y a la provisión de cambios neuronales mediante el empleo de la acción/observación. Además, se procura la captura de la atención del paciente empleando contenido dinámico y entretenido de forma interactiva.<sup>18</sup>

**Plataforma Interactiva de Kinect aplicada al Tratamiento de Niños Autistas:** Esta plataforma está conformada por seis aplicaciones, diseñadas cuidadosamente para ser implementadas como herramientas terapéuticas en el desarrollo de niños con autismo. Esta colección de aplicaciones desarrolla un entorno agradable tanto para el usuario como para el terapeuta, fomentando la mejora en el desarrollo del niño autista de una forma divertida. Esta plataforma, consiste en que el usuario (paciente) controle el cursor utilizando su mano

izquierda o derecha, según lo establezca previamente el especialista o terapeuta. Cuando el cursor se encuentre sobre la imagen de cualquiera de los animales que se presentan, se activará el evento reproduce sonido del animal seleccionado, y también cambiará el fondo de la aplicación a uno relacionado con el animal elegido.<sup>11</sup>

De acuerdo a un análisis realizado de las herramientas tecnológicas mencionadas previamente, se han identificado una serie de características, tales como las ventajas y desventajas que estas ofrecen a los pacientes durante el proceso de RM, como se puede observar en la tabla 2.

**Tabla 2.** Ventajas y desventajas de las aplicaciones de RM

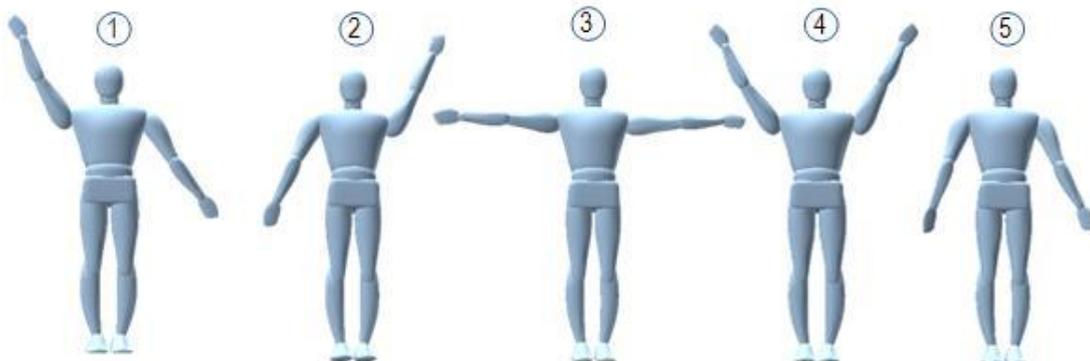
Sistemas	Ventajas	Desventajas
Sistema Toyra	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene como propósito asistir en la rehabilitación las extremidades superiores.</li> <li>• Permite la ejecución de ejercicios terapéuticos de forma interactiva.</li> <li>• Aumenta la motivación del individuo hacia su tratamiento.</li> <li>• Posibilita la medición objetiva y conocimiento del estado real del paciente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realiza una validación 2D de los movimientos.</li> <li>• Requiere de sensores para interactuar con el software (el costo de los sensores es de €990,00 cada uno)<sup>19</sup></li> </ul>
Phantom-Omni	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realiza validación de movimientos de coordinación ojo-mano.</li> <li>• Proporciona un ambiente virtual donde se desarrollan diferentes ejercicios de rehabilitación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realiza una validación 2D de los movimientos.</li> <li>• Requiere de un dispositivo háptico para interactuar con el software.</li> <li>• El costo del dispositivo es de MXN \$49 444,40<sup>20</sup>.</li> </ul>
Terapia de Gestos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporciona un ambiente virtual para la rehabilitación motriz de las extremidades superiores.</li> <li>• Se basa en actividades de la vida diaria</li> <li>• Usa cámara Web.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realiza una validación 2D del movimiento de la mano.</li> <li>• Requiere controladores especiales (implementados por los autores).</li> <li>• Presenta un problema de confusión del color de la mano con otro objeto de coloración semejante a la piel humana.</li> <li>• Los cambios en la iluminación pueden afectar a la precisión del sistema de visión.</li> </ul>
ARMEO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El paciente realiza una terapia de forma entretenida.</li> <li>• Fomenta los movimientos de los brazos por medio de tareas específicas.</li> <li>• Permite la rehabilitación de las extremidades superiores.</li> <li>• Tiene un área de trabajo tridimensional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debido a su alto costo, este sistema no está orientado a la rehabilitación en el hogar.</li> <li>• Requiere de un dispositivo háptico (brazo robótico) para manipular las aplicaciones que trae implementado.</li> </ul>
VirtualRehab	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la rehabilitación motriz de pacientes con esclerosis múltiple.</li> <li>• Requiere simplemente una <i>Kinect</i> para <i>Windows</i>, y un <i>PC</i> conectado a un monitor.</li> <li>• Mayor adherencia al tratamiento</li> <li>• Sencillo e intuitivo manejo</li> <li>• Válido para distintos grados de discapacidad</li> <li>• Apto para uso con silla de ruedas.</li> <li>• Emplea tecnología de bajo costo <i>Kinect</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toma en cuenta un único punto clave (mano) de las extremidades superiores del paciente en el proceso de validación.</li> </ul>
Framework para la Rehabilitación Física	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la rehabilitación física de miembros superiores.</li> <li>• Intuitivo y natural para el paciente.</li> <li>• Es de bajo costo y fácil de reproducir en instalaciones hospitalarias o el hogar.</li> <li>• Emplea tecnología de bajo costo <i>Kinect</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se toma en cuenta los codos y hombros del paciente en el proceso de validación.</li> </ul>
Plataforma Interactiva de <i>Kinect</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite que más niños logren un desarrollo óptimo de sus habilidades.</li> <li>• Emplea tecnología de bajo costo <i>Kinect</i>.</li> <li>• Es un prototipo de trabajo de investigación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se toma en cuenta los codos y hombros del paciente en el proceso de validación.</li> </ul>

De las tecnologías expuestas previamente, se ha identificado que entre los sistemas que dificultan en cierta medida el desarrollo de los ejercicios físicos de los pacientes son: el sistema Toyra, Phantom-Omni, Terapia de Gestos y el sistema ARMEO, debido a que requieren principalmente de dispositivos para cumplir su objetivo, es decir, los pacientes de manera obligatoria tienen que colocarse un conjunto de dispositivos o sensores en sus extremidades, a fin de enviar datos al software y de esta forma puedan realizar su tratamiento para rehabilitación motriz. En cambio, las otras propuestas, brindan ventajas a los pacientes debido al uso del sensor Kinect, sin embargo, éstas solo consideran los movimientos de la mano, por lo que el resto de los puntos clave (codo y hombros) no son considerados para conocer si un ejercicio o rutina es realizado correctamente.

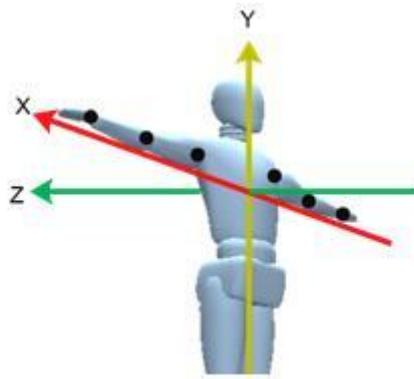
Esta propuesta tiene como objetivo emplear la información de las coordenadas de los puntos clave de los hombros, codos y muñecas obtenidas mediante el sensor Kinect y con ello, validar los movimientos de coordinación de las extremidades superiores. Para las pruebas se analizaron algunos ejercicios utilizados en tratamientos con la finalidad de determinar posibles umbrales de movimiento, debido a que no todas las personas poseen la misma flexibilidad en las extremidades superiores.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La información que proporciona el sensor permite validar los movimientos de coordinación de las extremidades superiores, en base a los puntos clave definidos de los hombros, codos y muñecas (Fig. 3) y a sus coordenadas 3D (Fig. 4).



**Fig. 3.** Movimientos de coordinación de las extremidades superiores del cuerpo humano



**Fig. 4.** Eje de coordenadas X, Y, Z

Haciendo un análisis del problema planteado, se ha identificado que una alternativa sencilla que lo soluciona es el uso de pendientes de funciones lineales, debido a que es posible generar segmentos (Fig. 5) entre dos puntos clave y de esta forma conocer el valor de la pendiente que tiene cada segmento en un tiempo determinado.



**Fig. 5.** Segmentos de las extremidades superiores

Con referencia a lo anterior, es necesario tener en presente que la pendiente de una recta en un sistema de representación triangular, suele darse por la letra  $m$ , y es definido como el cambio o diferencia en el eje Y dividido por el respectivo cambio en el eje X, entre dos puntos de la recta. El valor de la pendiente a partir de dos coordenadas, se obtiene mediante la ecuación (1).

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

De esta forma, se presentan los tipos de pendientes que existen en un plano 2D y que se describen a continuación.

- Recta con pendiente positiva: Se caracteriza porque tiene un ángulo de inclinación menor a 90 grados con respecto a la horizontal.
- Recta con pendiente negativa: Se caracteriza por tener un ángulo de inclinación mayor a 90 grados con respecto al eje "x".
- Recta con pendiente nula: Es aquella que no forma ningún ángulo, es decir si realizamos un trazo de una recta en un plano cartesiano, entonces cualquier recta

que sea paralela al eje "x" es horizontal, y por tanto su pendiente es cero.

- Recta con pendiente infinita: Es aquella que al trazarla se obtiene una recta paralela al eje "y", y desde la definición formal diremos que su pendiente es infinita.

Los criterios establecidos hasta el momento, constituyen la base para dar solución al problema de validación de los movimientos de coordinación de las extremidades superiores.

Ahora bien, para llevar a cabo el proceso de implementación del algoritmo, fue necesario realizar una investigación del software requerido en el desarrollo de juegos 3D usando el sensor *Microsoft Kinect*.

Hoy en día, uno de los dispositivos más novedosos y recientemente utilizados es el sensor *Microsoft Kinect*. Este dispositivo permite a los usuarios controlar e interactuar con las aplicaciones de software de manera natural, reconoce los movimientos del cuerpo humano al situarse frente a su espacio visual.<sup>18,21,22,23</sup>

El sensor *Microsoft Kinect* fue liberado en el 2010, inicialmente se utilizó para aplicaciones de entretenimiento, sin embargo debido a que este dispositivo tiene la capacidad de detectar un total de 20 puntos clave o articulaciones del cuerpo humano se ha comenzado a utilizar para otro tipo de aplicaciones, principalmente en el área de la salud.<sup>24</sup>

Con base en las grandes ventajas competitivas que ofrece el sensor Kinect frente a los dispositivos hápticos\*, se ha identificado que puede ser utilizado en el proceso de RM porque permite a pacientes desarrollar con plena libertad sus ejercicios y de esta forma mejora su movilidad a un nivel más óptimo.

Se plantea que el sensor del Kinect detecte los movimientos las extremidades superiores, a partir de esto se obtienen las coordenadas de los puntos clave, posteriormente se eligen las coordenadas (X, Y, Z) de las extremidades superiores, a continuación se determinan los segmentos de dichas partes, teniendo esta información se procede a calcular las pendientes lineales con respecto a las coordenadas X, Y (vista frente) y X, Z (vista arriba), a continuación se validan los movimientos conforme a la información predefinida de los ejercicios de coordinación y a los umbrales definidos para cada vista, los resultados de las actividades se almacenará en un archivo para que el especialista evalúe la rutina.

El diagrama general de la propuesta se muestra en la figura 6.

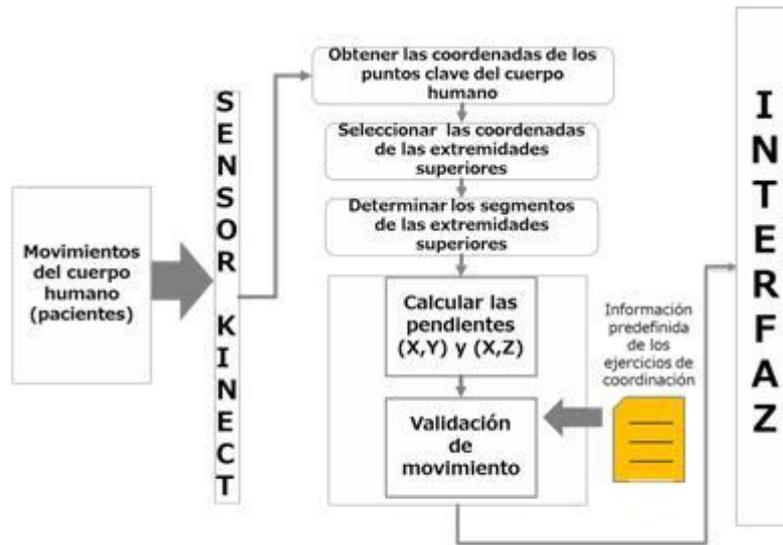


Fig. 6. Diagrama general del sistema de validación de movimiento

A continuación se presentan los resultados obtenidos al implementar la validación de movimientos de coordinación en extremidades superiores.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para llevar a cabo las pruebas se realizó lo siguiente:

1. Instalación de los equipos y materiales a utilizar.

Los equipos y materiales que se utilizaron para el desarrollo de las pruebas son: Sensor *Microsoft Kinect*, Mesa de trabajo, Computadora y un espacio de aproximadamente de 4 metros cuadrados, para que los usuarios puedan realizar libremente sus rutinas de ejercicios.

2. Descripción de la dinámica.

El usuario deberá colocarse a 2 metros de distancia frente al espacio visual del sensor *Kinect*, para que pueda desarrollar sus rutinas de ejercicios libremente, en caso contrario, este dispositivo no podrá reconocer adecuadamente las extremidades del cuerpo humano.

Durante las pruebas, el usuario tendrá que extender los brazos de acuerdo a la rutina que aparezca en el software (la duración de cada rutina es de 20 segundos). Al término de éstos, el sistema proporciona 5 segundos de descanso para que el usuario se relaje y pueda continuar con la siguiente hasta terminar la prueba.

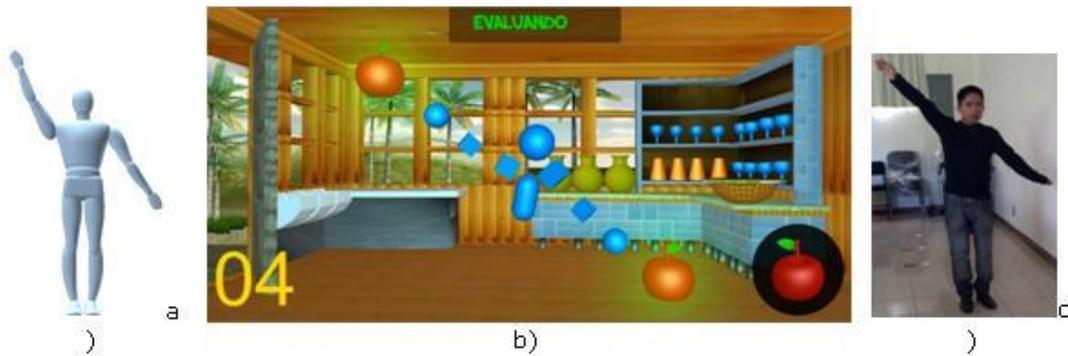
Al finalizar la prueba, el sistema generará un informe sobre los movimientos realizados por el usuario.

En la fase de pruebas del algoritmo se contó con la participación de un total de 21 usuarios, a quienes se les indicó previamente el procedimiento a seguir. Los

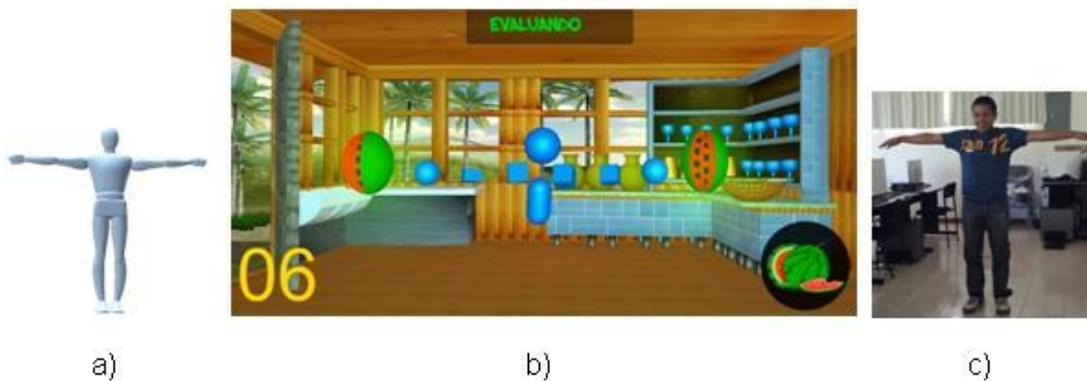
movimientos de coordinación de las extremidades superiores que fueron realizados por dichos usuarios se muestran en la figuras 7, figura 8, y en la figura 9.



**Fig. 7.** Movimientos de coordinación de las extremidades superiores del cuerpo humano que contiene el sistema



**Fig. 8.** a) Movimiento requerido (diagonal), b) Interfaz del sistema y c) movimiento del usuario



**Fig. 9.** a) Movimiento requerido (recta), b) Interfaz del sistema y c) movimiento del usuario

Mediante los informes generados por el software, se pudo identificar que los movimientos que más complicación presentaron para los usuarios, son los que se muestran en la figura 10.



**Fig. 10** Movimientos de coordinación que causaron dificultad a usuarios durante las pruebas.

En la tabla 3 se presenta el número de rutinas que los usuarios realizaron de manera correcta al interactuar con el software.

**Tabla 3.** Evaluación del sistema

Usuarios	No. Ejercicios realizados correctamente	Fue difícil	Fue agradable	Calificación del 0-10 otorgada por los usuarios
1	6	SI	SI	9
2	7	NO	SI	9
3	6	NO	SI	9
4	9	NO	SI	9
5	6	NO	SI	9
6	5	NO	SI	8
7	5	SI	SI	8.5
8	8	NO	SI	9
9	8	SI	SI	9
10	8	NO	SI	8
11	5	SI	SI	9
12	5	NO	SI	9
13	2	SI	NO	8
14	8	NO	SI	9
15	4	SI	SI	8
16	8	NO	SI	10
17	7	NO	SI	9
18	8	NO	SI	8
19	7	NO	SI	9
20	7	SI	SI	10
21	6	NO	SI	8

El desarrollo de estos movimientos, reflejó la importancia que tiene el nivel de profundidad en los ejercicios de coordinación de las extremidades superiores, ya que la mayoría de los usuarios realizaban este movimiento con una inclinación

diferente. Por tal motivo se ajustaron los valores de los umbrales para la validación, para la vista frente se empleó un umbral de 0.5 y para la vista arriba fue de 0.6.

El usuario 13 realizó 2 ejercicios de manera correcta, el resto de los ejercicios no los llevó a cabo debido a diferentes factores como: condición física (masa corporal), nivel de profundidad en que realizó las rutinas y además, no le fue posible conservar una postura durante 10 segundos, por tal motivo, él mencionó que la funcionalidad del algoritmo no es agradable dándole una calificación de 8. Sin embargo, sostuvo que estos casos deberían ser considerados en un futuro. Al resto de los usuarios les interesó la forma de interactuar con este tipo de aplicaciones, debido a que no tenían conocimiento de que esta tecnología (Kinect) pudiese ser utilizada para fines médicos, el cual en un principio estaba orientado únicamente hacia los videojuegos.

Por su parte, 8 usuarios realizaron entre 5 y 6 ejercicios de manera correcta de 10 posibles y a pesar de esto, manifestaron que les falta mejorar sus movimientos de coordinación.

Cabe mencionar, 11 usuarios se adaptaron rápidamente a la dinámica del juego logrando hacer entre 7 y 9 ejercicios de manera correcta de un total de 10. Además, mencionaron que los resultados obtenidos, se debe a que en todo momento estuvieron concentrados tanto en la dinámica del juego, como también en la postura solicitada por el sistema de software, y así conseguir el mayor número de ejercicios de manera correcta posible. Además, recalcaron que siempre estuvieron poniendo atención para corregir algunos movimientos de profundidad, por lo que constantemente rectificaban la posición de sus brazos. El promedio de calificación recibida para el sistema fue de 8.78.

Por cada prueba realizada del algoritmo se generó un informe, mismo que da a conocer si los movimientos fueron realizados correctamente, además muestra el margen de error de cada una de las pendientes de los segmentos de las extremidades superiores tanto de la vista frente como de la vista desde arriba. Dicho informe apoya es útil para los especialistas interesados en la rehabilitación motriz como una herramienta de apoyo para verificar la efectividad de sus tratamientos.

Con la finalidad de verificar que el algoritmo cumple con el objetivo asignado, en la tabla 4 se muestra un cuadro comparativo en donde se ha tomado como referencia la información predefinida de los movimientos de coordinación, el promedio de cada una de las pendientes calculadas (de un usuario) y el margen de error que se obtiene al finalizar una rutina en específica.

**Tabla 4.** Evaluación del sistema

1	{ -1, -1, -1, -1, 0, 0, 0, 0 }	-1.016, -1.147, -1.020, -0.426, -0.084, 0.174, 0.212, -0.158	0.016, 0.147, 0.020, 0.574, 0.084, 0.174, 0.212, 0.158
2	{ 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0 }	5.219, 1.330, 0.329, -8.801, 1.791, 0.575, -0.048, 2.827	4.219, 0.330, 0.671, 9.801, 1.791, 0.575, 0.048, 2.827
3	{ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 }	-6.072, 2.512, -2.443, 5.437, 3.242, -0.721, 0.671, -2.867	6.072, 2.512, 2.443, 5.437, 3.242, 0.721, 0.671, 2.867
4	{ -1, -1, 1, 1, 0, 0, 0, 0 }	-0.578, -0.664, 0.794, 0.522, -0.229, 0.015, 0.177, -0.078	0.422, 0.336, 0.206, 0.478, 0.229, 0.015, 0.177, 0.078
5	{ 1, 1, -1, -1, 0, 0, 0, 0 }	0.803, 0.841, -1.011, -0.802, -0.313, 0.105, -0.060, 0.189	0.197, 0.159, 0.011, 0.198, 0.313, 0.105, 0.060, 0.189

Los datos de la tabla anterior muestran que las rutinas 1, 4 y 5 fueron realizadas de manera correcta debido a que el margen de error de las mismas no excede los umbrales 0.5 y 0.6. Por lado, el margen de error de las rutinas 2 y 3 tienen un valor superior a los umbrales, por tal motivo el sistema señaló que las rutinas fueron realizadas incorrectamente.

Es importante señalar que los resultados obtenidos si los ejercicios fueron realizados correctamente, la decisión final la tendrá el médico especialista. Como menciona Cruz y cols. (2013) es necesario realizar al menos seis meses de prueba para que los usuarios puedan mejorar la coordinación de sus extremidades superiores.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo de investigación partió de la necesidad de coadyuvar a los médicos especialistas en los tratamientos de rehabilitación motriz, mediante la introducción de las nuevas tecnologías, como lo es el sensor Microsoft Kinect debido a que recientemente se ha identificado que esta tecnología ha tenido un importante auge en el campo de la medicina.

Para afrontar este reto, se diseñó un algoritmo que valida los movimientos de coordinación de las extremidades superiores del cuerpo humano usando pendientes lineales integrada a un ambiente 3D y utilizando el sensor Kinect para obtener los puntos clave, además se usó la librería OpenNi para acceder sus funcionalidades. Los resultados obtenidos de dicho algoritmo mostraron una respuesta favorable por

parte de los usuarios, lo cual permitió realizar los ajustes correspondientes a cada umbral y de esta forma permitir que los usuario puedan realizar adecuadamente su rutina.

Finalmente, el enfoque de este trabajo es que coadyuve en la rehabilitación de las extremidades superiores y a su vez sirva para contemplar en un futuro, todas las extremidades que conforman la estructura corporal.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Guzmán A. Necesidades educativas especiales asociadas a discapacidad motora. Guía de apoyo técnico pedagógico: Necesidades educativas especiales en el nivel de educación parvulario. Santiago. Chile. 2007.
2. Oropeza JM. Desarrollo de un ambiente virtual para la rehabilitación de las extremidades superiores [Tesis de Licenciatura]. Facultad de Ciencias de la Computación-Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. 2012.
3. Gorgatti G, Böhme M.T.S. Autenticidad de científica de um teste de agilidade para individuos em cadeira de rodas. Revista Paulinista de Educação Física. 2003.17 (1), 41-50.
4. Malouin F, Richards C, McFadyen B, Doyon J. Nouvelles perspectives en réadaptation motrice après un accident vasculaire cérébral. Médecine Sciences. 2003. 19 (10), 994-998.
5. Villavicencio I, Franco J, Sucar E, Ron S. Actividades simuladas de la vida diaria para rehabilitación motora del miembro superior en pacientes con enfermedad vascular cerebral. Arch Neurocién (Mex). 2009. 14 (4), 237-242.
6. Terapia-Física™.com. Terapia Física [Internet]. Consultado el 15 de Marzo de 2014, disponible en: <http://www.terapia-fisica.com/enfermedades-y-tratamientos.html>
7. García S, González M, Ibarra R, Martin C, Molina E, Sellés Á, Mata TD. Ejercicio físico para todos los mayores. Ed. Briefing-PLV, Madrid España. 2007, 29-39.
8. Miguel EP. Parkinson día a día: Antes de decir "no puedo" ¡inténtalo!, Ed. Gema Córdoba Ortega, Madrid España. 2009, 18-22.
9. Oreste D. Ejercicios físicos y gimnasia para la rehabilitación motora. 2014. [consultado el 2 de marzo de 2016]. Disponible en: [http://www.parkinson-italia.info/e\\_gym\\_spa/spa21.php](http://www.parkinson-italia.info/e_gym_spa/spa21.php)
10. FEM-Fundación de Esclerosis Múltiple. Ejercicios prácticos de estiramiento para las personas con esclerosis múltiple. 2013. [consultado el 2 de marzo de 2016] Disponible en: [http://www.observatorioesclerosismultiple.com/esp/vivir\\_con\\_la\\_em-deporte/ejercicios\\_practicos\\_de\\_estiramiento\\_para\\_las\\_personas\\_con\\_esclerosis\\_multiple/detalle.html#.Uyij6tLuLp4](http://www.observatorioesclerosismultiple.com/esp/vivir_con_la_em-deporte/ejercicios_practicos_de_estiramiento_para_las_personas_con_esclerosis_multiple/detalle.html#.Uyij6tLuLp4)

11. Cruz R, Fabela HF, Morales A. Plataforma Interactiva de Kinect Aplicada al Tratamiento de Niños Autistas. Tesis de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica. Instituto Politécnico Nacional-IPN, México D.F. 2013.
12. Salinas E. Sistema para el estudio del equilibrio en humanos usando la plataforma Wii Balance Board. Tesis de ingeniería en ciencias de la computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla-BUAP, Puebla, México. 2011.
13. Lange B, Chang Ch, Suma E, Newman B, Rizzo AA, Mark B. Development and Evaluation of low cost game-based balance rehabilitation tool using using the Microsoft kinect sensor. 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC. Boston Massachusetts. 2011.
14. Ordóñez YZ; Luna CA. Herramienta de Entretenimiento Virtual en 2D para Rehabilitación de Motricidad Fina en Miembro Superior con Incorporación de un Dispositivo Háptico. Revista Ingeniería Biomédica. 2013. 7 (14), 60-68.
15. Indra. Indra ofrece servicios en "la nube" para la rehabilitación motriz de los miembros superiores del cuerpo humano. 2013. [consultado el 2 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://www.indracompany.com/noticia/indra-ofrece-servicios-en-la-nube-para-la-rehabilitacion-motriz-de-los-miembros-superiores-d>
16. Hocoma. Armeo® Therapy Concept. 2014. [consultado el 2 de marzo de 2016] Disponible en: [www.hocoma.com/fileadmin/user/Dokumente/Armeo/bro\\_Armeo\\_Therapy\\_Concept\\_140226\\_en.pdf](http://www.hocoma.com/fileadmin/user/Dokumente/Armeo/bro_Armeo_Therapy_Concept_140226_en.pdf)
17. Virtualware. VirtualRehab. [consultado el 2 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://www.virtualrehab.info/es/>
18. Moreno F, Ojeda J, Ramírez E, Mena Ch, Rodríguez O. Un Framework para la Rehabilitación Física en Miembros Superiores con Realidad Virtual. Primera Conferencia Nacional de Computación, Informática y Sistema (CoNCIS). 2013. Caracas, Venezuela. Ordóñez, Yamile Zuleima.
19. Xsens. MTi-10-IMU-2A5G4-DK. 2014. [consultado el 2 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://shop.xsens.com/shop/mti-10-series/mti-10-imu/mti-10-imu-2a5g4-dk>
20. eBay. Phantom-Omni [Internet]. Recuperado de: <http://www.ebay.com/sch/i.html?nkw=phantom+omni>
21. Viforcós EM. Aplicación de las cámaras 3D al reconocimiento de actividades [Tesis de Licenciatura]. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Carlos III de Madrid, Madrid. 2012.
22. Microsoft. Xbox360. 2014. [consultado el 2 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://www.xbox.com/es-ES/Kinect/>
23. Garrido D. Aplicaciones de Kinect para Neurorehabilitación. Tesis de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad en Telemática, Universidad Politécnica de Catalunya, Catalunya. 2012.

24. Mathe L, Samban D, Gómez G. Estudio del funcionamiento del sensor Kinect y aplicaciones para bioingeniería. Proyecto final de carrera de Ingeniería en Computación, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Veracruz. 2012.

Recibido: 11 de noviembre de 2015.

Aprobado: 6 de marzo de 2016.

\*Un dispositivo háptico es un medio para realizar contacto físico entre la computadora y el usuario, por lo general mediante un dispositivo de entrada o salida, como una palanca de mando o guantes, que permiten transmitir los movimientos del cuerpo.