

Descripción y evaluación de una herramienta de rehabilitación para los miembros superiores con gamificación y realidad aumentada

Description and evaluation of a rehabilitation tool for upper limbs with gamification and augmented reality

Gabriel Fuertes Muñoz

Edison Desarrollos SL
Teruel, España
gabriel.fuertes@gmail.com

Jesús Gallardo

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas
Universidad de Zaragoza
Teruel, España
jesus.gallardo@unizar.es

Recibido: 24.09.2019 | Aceptado: 15.12.2019

Palabras Clave

Rehabilitación
Microsoft Kinect
Realidad Aumentada
Gamificación

Resumen

Mediante la terapia activa, el proceso de rehabilitación mejora, ya que se afianza la recuperación y se hace más rápida y efectiva. Para ello, deben realizarse de manera adecuada tanto la prescripción de ejercicios por parte del personal sanitario como su ejecución por parte de los pacientes. Sin embargo, a veces la falta de motivación de los pacientes provoca que estos ejercicios no se lleven a cabo o se hagan de manera incorrecta. Para ayudar en el proceso de terapia activa y evitar que se den estos problemas, hemos desarrollado KineActiv®, un sistema que hace uso del dispositivo Microsoft Kinect v2. KineActiv ayuda a la realización de ejercicios de rehabilitación de los miembros superiores, y para ello incluye enfoques de gamificación y de realidad aumentada. Con estas características se pretende motivar e implicar a los pacientes, mejorando así los resultados del proceso de rehabilitación. En el presente artículo se describe la herramienta KineActiv, y se mencionan las primeras actividades de evaluación que se están llevando a cabo para comprobar su usabilidad y utilidad.

Keywords

Rehabilitation
Microsoft Kinect
Augmented Reality
Gamification

Abstract

Active therapy is an activity that can improve a rehabilitation process, as it consolidates the recovery and makes it faster and more effective. In order to achieve those goals, both the prescription of exercises by medical personnel and the execution of such exercises by patients must be performed in a suitable way. However, the lack of motivation of patients sometimes cause the exercises not to be performed, or to be badly performed. To help in the active therapy process and to avoid these problems to occur, we have developed KineActiv®, a system that makes use of the Microsoft Kinect v2 device. KineActiv can help to perform rehabilitation exercises for the upper limbs, and includes some elements of gamification and augmented reality. The use of these features is expected to motivate the patients and make them get involved in the rehabilitation process, improving its results. In this paper, we describe the KineActiv tool, and we explain the first activities that we have carried out in order to test its usability and usefulness.

1. Introducción

Dentro del ámbito de la rehabilitación y el tratamiento de la salud, es un hecho demostrado que la terapia activa es un método que ayuda en el proceso de rehabilitación (Montagnini et al., 2017), afianzando la recuperación y haciendo que ésta sea más rápida y efectiva (Mehboob et al., 2017; Linhares et al., 2017). Llevar a cabo ejercicios de manera repetitiva puede ayudar a personas con dificultades motoras a superar con mayor facilidad las limitaciones que experimentan en su vida diaria. A pesar de esta afirmación un estudio indica que sólo el 31% de las personas que sufren algún trastorno de la movilidad ejecutan los ejercicios tal y como les han recomendado (Richards et al., 1999).

La gente a menudo cita la falta de motivación como un impedimento a la hora de realizar ejercicios regularmente de forma autónoma (Lloyd-Jones et al., 2010). Además, el número de ejercicios en una sesión de terapia es típicamente insuficiente (Lang et al., 2007). Una solución a esta cuestión es la intervención del personal sanitario: fisioterapeutas o rehabilitadores, normalmente. Sin embargo, esto puede no ser viable desde un punto de vista económico al necesitar contratar más personal para cubrir necesidades a largo plazo.

Todo esto lleva a que el paciente que se someta a un tratamiento de rehabilitación debe implicarse de una manera activa realizando ejercicios que le son prescritos por parte del personal sanitario. La realización de estos ejercicios normalmente se lleva a cabo en casa, sin la presencia del profesional, en las distintas sesiones que tiene concertadas. De esta manera, el profesional debe confiar en la correcta realización de los ejercicios pautados por parte del paciente. Una alternativa es que el personal sanitario decida que el paciente realice dichos ejercicios en su consulta, bajo su supervisión.

Por estos motivos decidimos que había que buscar una manera de suplir esa carencia y brindar la oportunidad de que los pacientes pudieran realizar los ejercicios que les eran pautados de una manera guiada y controlada, indicando si está realizando correctamente los ejercicios, corrigiendo sus errores, almacenando su evolución, etc., sin necesidad de que el terapeuta esté presente en todo momento. Además de esta manera los resultados obtenidos por cada uno de los pacientes después de cada sesión de terapia activa serán accesibles por parte del personal sanitario de manera inmediata y desde cualquier dispositivo conectado a Internet para así poder planificar la siguiente sesión presencial.

Por otro lado, el desarrollo del campo de las tecnologías de sensores y el abaratamiento de los precios han permitido

imaginar y desarrollar sistemas capaces de controlar de manera automática la frecuencia, duración y corrección de ejercicios (Saposnik et al., 2010). Además, el uso de interfaces de usuario multimodales y del concepto de gamificación pueden ser de ayuda también de cara a mantener al usuario motivado e implicado durante la realización de ejercicios (Flynn & Lange, 2010; Fuertes et al., 2019a).

Así, en este artículo presentamos el sistema de rehabilitación KineActiv®, un desarrollo basado en el dispositivo Microsoft Kinect v2. Se trata de un sistema que permite que los fisioterapeutas prescriban ejercicios a sus pacientes para así mejorar el proceso de rehabilitación entre sesiones de fisioterapia. El sistema incluye enfoques de gamificación y de realidad aumentada para obtener mejores resultados mediante una mejor motivación e implicación de los pacientes. KineActiv está pensado para rehabilitación de los miembros superiores.

El resto del artículo se estructura como sigue: en la sección 2 se comentarán algunos trabajos relacionados con el que se presenta, sobre todo de otros sistemas de rehabilitación que utilizan Microsoft Kinect. En la sección 3 se describirá la herramienta, haciendo hincapié en su arquitectura y su interfaz de usuario y en los problemas encontrados durante su desarrollo. En la sección 4 se comentará el trabajo inicial de validación llevado a cabo. Finalmente, en la sección 5 se comentarán el trabajo futuro y las mejoras que ya estamos llevando a cabo.

2. Trabajo Relacionado

En la actualidad se está trabajando ampliamente con el uso de tecnologías como Kinect, Wii, Balance Board (Gil-Gómez et al., 2011) y otros dispositivos para la rehabilitación y la ayuda en determinadas patologías de pacientes que han perdido la movilidad o poseen alguna enfermedad degenerativa que les impide de alguna manera. Así, puede verse que la tendencia actual es la de usar este tipo de tecnologías en pacientes que han sufrido una lesión cerebral (Venugopalan et al., 2013), tales como un infarto cerebral (Webster & Celik, 2014) o un accidente de tráfico, por ejemplo, además en pacientes con esclerosis múltiple u otro tipo de enfermedades degenerativas (Muñoz et al., 2013). El objetivo que tiene el uso de este tipo de tecnologías dentro del tratamiento de estas patologías es incitar a que el paciente realice los movimientos adecuados sin ser necesario mantener un control exhaustivo del movimiento, únicamente se requiere que se llegue a un objetivo para volver a educar al cerebro a recuperar una función perdida o mitigar la degeneración del movimiento.

Los pacientes de estas patologías suelen ser personas mayores (Sáenz-de-Urturi et al., 2015), ya que las

enfermedades a las que están dirigidos estos tipos de tratamientos y ejercicios son más frecuentes en este sector poblacional. El método más común de uso es en clínicas especializadas que tratan este tipo de patologías, de manera que el paciente se desplaza hasta las clínicas, aunque se está ampliando la posibilidad de realizar los ejercicios en sus hogares.

El uso de Kinect como herramienta para evaluar las variables cinéticas, en comparación con los métodos estándar actuales, es un tema de gran interés (Napoli et al., 2017). Aunque se han publicado varios estudios en esta área, la tendencia general ha sido comparar los sistemas de motion capture (MOCAP) basados en medidas de resumen escalar con los basados en medidas métricas.

Los dispositivos de interacción de las consolas de videojuegos de última generación, como Kinect, han mostrado un gran potencial con un coste de inversión reducido en comparación con otros tipos de sistemas. Nintendo Wii consta de un controlador inalámbrico que utiliza la aceleración integrada con sensores sensibles a cambios de dirección, velocidad y aceleración causados por movimientos de muñeca, brazo y mano. Dicho dispositivo se ha utilizado por ejemplo para la rehabilitación del ictus con resultados positivos (Saposnik et al., 2010).

Así, el dispositivo Microsoft Kinect está sirviendo de base para sistemas que están destinados a una amplia gama de tareas de rehabilitación con resultados más que satisfactorios. En este sentido, Chang et al. (2011) compararon el sistema óptico OptiTrack de alta fidelidad con el dispositivo Kinect y mostraron que Kinect puede realizar un seguimiento de movimiento competitivo como OptiTrack. Así, el dispositivo Kinect se incluyó en un sistema de rehabilitación de ictus para los miembros superiores, desarrollado como un entorno virtual interactivo (Ibarra Zannatha et al., 2013), usando la información de los movimientos del paciente, junto con las señales obtenidas de los dispositivos de medición ergonómicos, para supervisar y evaluar el progreso de la rehabilitación de ictus. Dentro de esta misma línea, se ha llevado a cabo un trabajo denominado RemoviEM (Lozano-Quilis et al., 2014), el cual se basa en la rehabilitación de pacientes con esclerosis múltiple, los cuales tienen mermadas sus facultades motoras, y a través de la creación de escenarios virtuales pueden realizar ejercicios de rehabilitación.

Otros estudios han demostrado que Kinect es un sensor suficientemente preciso y sensible para medir los movimientos gruesos, lo que lo hace adecuado para los sistemas de rehabilitación de apoplejía (Webster & Celik, 2014) o para medir los síntomas del movimiento en personas

con enfermedad de Parkinson (Galna et al., 2014). Dentro de este enfoque existen otros sistemas y programas que pueden utilizarse dentro de la rehabilitación física. Uno de ellos es KINOVEA (Alankus et al., 2010), que es un software de biomecánica deportiva que también se usa en la rehabilitación física. Se trata de un analizador de video que se usa como recurso para evaluar, corregir y llevar un seguimiento de la técnica en los movimientos. Permite la medición de tiempos, ángulos, trayectorias, perspectivas y coordenadas. Se trata de un sistema potente, pero tiene el inconveniente de que se debe grabar el movimiento para después ser estudiado.

Un programa similar es Skill Spector (Wollersheim et al., 2010), el cual usa el mismo sistema grabación de video para un posterior estudio del mismo. Del mismo modo, se pueden establecer puntos de las articulaciones a estudiar, así como ángulos, coordenadas o sistema de medición.

También cabe mencionar un desarrollo por parte de la empresa Diaple (Pastor et al., 2012). En ese trabajo se hace uso del dispositivo Kinect para la rehabilitación física. Previamente el fisioterapeuta deberá grabar en vídeo el ejercicio que posteriormente deberá imitar el paciente. Una vez ejecutado se realiza una comparación de cada uno de los ejercicios y en base a la similitud se otorga una puntuación al paciente. Este sistema, al igual que los mencionados anteriormente, no corrigen ni mejoran en tiempo real lo realizado por parte del paciente.

En otros trabajos se ha determinado que puede rastrear el movimiento del cuerpo con la precisión requerida para las pruebas de equilibrio estándar (Funaya et al., 2013), como la evaluación del equilibrio de pie (Yang et al., 2014) y se ha comparado a Kinect con técnicas más establecidas para la estimación de la pose usando datos de captura de movimiento (Obdrzalek et al., 2012). En este trabajo, se evaluó la precisión y robustez de la estimación de la postura de Kinect para posturas de personas mayores en posiciones de pie y sentadas. Los resultados fueron positivos, indicando que podría ser utilizado para la realización de ejercicios de terapia activa.

La principal ventaja de usar el sensor de Kinect sobre las alternativas disponibles en el mercado se encuentra en el algoritmo propio de Microsoft, que realiza la detección del cuerpo en tiempo real y que puede explotarse utilizando el Kit de Desarrollo de Software de Microsoft (SDK) (Microsoft, 2019).

3. Descripción del sistema

En esta sección vamos a comentar las características de KineActiv, que es el sistema que hemos desarrollado como ayuda para los fisioterapeutas a la hora de tratar con pacientes de rehabilitación. De esta manera, hemos diseñado un producto que incentiva a los pacientes a la realización de los ejercicios pautados con la implementación de un entorno gamificado (Flynn et al., 2010), en el que se establecen los objetivos marcados por el profesional. Se trata de un entorno gamificado porque se han introducido características propias de juegos (misiones, recompensas, etc.) a la ejecución de los ejercicios de rehabilitación. La principal diferencia entre KineActiv y otros sistemas similares es que se evalúan los movimientos de los pacientes en tiempo real, mostrando mensajes de aviso al usuario para que este pueda alcanzar un movimiento casi ideal en cada ejercicio.

3.1 Arquitectura del Sistema

La arquitectura del sistema sigue una estructura cliente-servidor con una base de datos común a los dos entornos. Por un lado, poseemos un entorno web adaptable (responsive), a través del cual cada centro clínico tiene la posibilidad de dar de alta a los fisioterapeutas y pacientes que posee. Éstos a su vez pueden registrar las patologías dentro de cada historial de los pacientes que traten.

Para cada patología se crean sesiones de ejercicios que deben realizar los pacientes, ya sea en el centro clínico o en su domicilio, en la fecha que haya sido establecida, sin posibilidad de poder repetir la sesión si no es abierta nuevamente por el fisioterapeuta.

El sistema será accesible desde cualquier dispositivo que posea conexión a Internet para poder ver los resultados de los ejercicios realizados, en tiempo real, con datos precisos y gráficas de evolución y resultados.

Por otro lado, tenemos un entorno gamificado para el paciente, el cual se ha desarrollado en Unity y hace uso del dispositivo Kinect 2 de Microsoft.

Para realizar la valoración de cada uno de los pacientes, se guarda cómo es la estructura de cada persona y la articulación a tratar. Por ejemplo, si se debe realizar la rehabilitación de un hombro, se almacena la posición del hombro, codo y muñeca, así como la longitud de la extremidad, además de otros datos relevantes para la ejecución de los ejercicios.

Una vez finalizados los ejercicios pautados, el sistema se conecta con la base de datos y envía de manera automática lo realizado por el paciente para su posterior estudio por parte del profesional sanitario. Así pues, una vez recibidos los

resultados, el sistema cierra automáticamente la posibilidad de repetir los ejercicios.

El especialista podrá acceder al sistema web desde cualquier dispositivo que tenga acceso a internet para acceder a las estadísticas y las gráficas generadas por el sistema para los ejercicios que ha hecho el paciente. De esta manera puede ver si la evolución es la esperada o si se ha producido algún problema en la ejecución, ya sea por desconocimiento, desconfianza, dolor del paciente o cualquier otro motivo que le haya impedido la correcta realización de lo pautado.

En cualquier caso, con los resultados obtenidos, es posible planificar las sucesivas sesiones de rehabilitación, ya sea para avanzar más rápidamente o por el contrario modificar las pautas para adaptarlas a la evolución del paciente.

3.2 Metodología

En esta sección se comentarán diversos aspectos metodológicos y de funcionamiento del sistema, así como ciertos detalles de la gamificación. Una explicación más detallada de lo que aquí se cuenta se puede encontrar en (Fuertes et al., 2019b).

3.2.1 Adquisición de datos

La fase de adquisición de datos consiste en un entorno desarrollado con el motor Unity, con la integración del SDK de Microsoft Kinect 1.8. Debido al enfoque de nuestro trabajo, capturaremos las articulaciones de la muñeca, el codo y el hombro en tiempo real. Estas coordenadas son calculadas en el espacio 30 veces por segundo, con una precisión de hasta 20 decimales, con lo que podemos conocer la ubicación de las mismas en cualquier momento que sea necesario.

Antes de comenzar cualquier ejercicio, el sistema comprueba que el paciente esté posicionado correctamente. La distancia óptima para la realización de los ejercicios es entre 2 y 4 metros, desde la posición del sensor Kinect. Aunque las especificaciones del dispositivo indican que funcionan correctamente entre 0.4 m. hasta los 8.5, se considera que el rango óptimo es desde los 1.4 hasta los 4.5 metros (Nguyen et al., 2019).

El sistema desarrollado es capaz de detectar posiciones y gestos incorrectos del paciente, así como indicar en qué sentido debe moverse el paciente para la correcta ejecución del ejercicio.

3.2.2 Entorno de usuario gamificado

Como ejemplos de ejercicios nos vamos a centrar en dos casos, uno de ejercicios concéntricos y otro de isométricos. El primero consiste en repeticiones de elevación del brazo hasta alcanzar un ángulo de elevación objetivo, establecido por el fisioterapeuta. En el segundo, el brazo se eleva hasta una

posición concreta y se mantiene en esa posición un cierto periodo de tiempo, también establecido por el especialista. En ambos casos, los objetivos son personalizados, dependiendo de las circunstancias de cada paciente.

Para animar a que los pacientes consigan sus objetivos, se han diseñado e implementado entornos y juegos específicos. La ejecución de ejercicios concéntricos es parte de un juego que genera un *alien* que amenaza una ciudad y lo ubica en el lugar exacto al que tiene que elevar el brazo el paciente (objetivo preestablecido por el profesional). En el supuesto caso de que el paciente no alcance el objetivo o no lo haga dentro de los parámetros marcados por el fisioterapeuta en la ejecución del movimiento, el alien realizará un ataque sobre una ciudad situada en la parte inferior de la pantalla. El alien está diseñado con el fin de seguir al paciente en todo momento durante la ejecución del ejercicio, con el fin de permitir cierta movilidad espacial, y siempre mantendrá la posición objetivo a alcanzar. Se pueden identificar dos escenarios en este ejercicio:

- Positivo. El paciente realiza correctamente la ejecución del ejercicio, alcanzando al alien, destruyéndolo y manteniendo la ciudad a salvo. Una vez que el paciente lleve el brazo a la posición de descanso, se genera otro alien que será posicionado en el mismo lugar.
- Negativo. El paciente realiza erróneamente la ejecución del ejercicio, y falla al intentar alcanzar la posición objetiva donde se encuentra el alien. En este caso, el alien atacará la ciudad lanzando bolas de fuego.

El sistema guarda cuántas repeticiones han sido correctas y cuántos fallos se ha producido en cada una de las series, almacenando los datos en un sistema en la nube.

En cuanto al ejercicio isométrico está basado en un juego totalmente diferente al anterior. Consiste en un pájaro que está volando en la mano del paciente y existe una jaula ubicada en el lugar exacto (grados objetivos a alcanzar) donde el paciente debe mantener su mano durante un cierto periodo de tiempo, también estipulado por el fisioterapeuta. Así pues, se espera que el paciente sea capaz de llevar el pájaro de su mano hasta la jaula y lo mantenga ahí encerrado.

En este juego también se pueden identificar dos escenarios.

- Positivo. El paciente realiza una correcta ejecución del ejercicio, alcanzando la jaula y manteniendo el pájaro en la jaula durante el tiempo prescrito de forma continua, por lo que el pájaro se posa y descansa.
- Negativo. El paciente ejecuta el ejercicio de manera incorrecta, no pudiendo mantener al pájaro dentro de la jaula el tiempo requerido, volviendo éste a volar en su mano fuera de la jaula.

El sistema almacena el periodo de tiempo que el paciente ha sido capaz de aguantar en la posición requerida con el pájaro enjaulado para cada una de las repeticiones de cada serie, dentro de un sistema en la nube.

3.2.3 Monitorización y medición

La fase de monitorización y medición se puede dividir en las siguientes tareas:

1. Calibración del paciente
2. Establecimiento del margen de tolerancia
3. Monitorización de las articulaciones
4. Manejo de oclusiones

En lo que se refiere a la **calibración del paciente**, dado un paciente, el primer paso tiene la intención de capturar sus datos biométricos, de modo que los límites asociados a los ejercicios prescritos puedan determinarse de manera confiable. Se asegura así que el paciente realice los ejercicios dentro de un entorno personalizado.

Una vez que el paciente está bien posicionado y en posición vertical, las coordenadas 3D del hombro, el codo y la muñeca se utilizan para calcular la longitud del brazo (distancia desde el hombro hasta la muñeca). Luego se define un vector euclidiano tomando la coordenada del hombro como el punto inicial, la longitud del brazo como su magnitud y utilizando el tipo de acción (abducción, flexión) y el ángulo establecido por el fisioterapeuta para definir la dirección del vector. El punto final de este vector determina la posición objetivo personalizada del ejercicio, donde se generarán los elementos gamificados.

El segundo paso es el **establecimiento del margen de tolerancia**. Los márgenes de tolerancia definen una región 3D personalizada para cada paciente y ejercicio, fuera del cual cualquier movimiento se considera una ejecución incorrecta. También se considera un paso de calibración, porque los márgenes dependen de la condición del paciente.

Se han considerado dos tipos de movimientos en este trabajo: abducción y flexión. Comienzan desde una posición de pie, con los brazos paralelos al tronco. En la abducción, el brazo de interés se eleva en línea recta en el *plano del tronco* hasta alcanzar el ángulo objetivo. La flexión es similar, excepto que el brazo se eleva hacia adelante, en un plano perpendicular al del tronco. En ambas acciones, la posición objetivo de la mano al final del movimiento está modelada por un elemento gamificado. La Figura 1 ilustra los márgenes de tolerancia establecidos para la abducción y la flexión (vista cenital).



Figura 1. Márgenes de tolerancia para la abducción y la flexión.

En los ejercicios de abducción, se definen dos márgenes de tolerancia (frontal y posterior) a partir de dos planos no paralelos cuya intersección está determinada por las coordenadas del hombro. Esta geometría abierta admite ejercicios de abducción de pacientes con un amplio espectro de condiciones físicas. En flexión, el fisioterapeuta establece dos márgenes paralelos de tolerancia, que a su vez son perpendiculares al plano del tronco. En cada caso, los dos márgenes delimitan una región 3D válida, que no puede ser superada por ninguna articulación en ningún momento. Cuando una articulación rompe un margen, el sistema interpreta el error e informa al paciente cómo corregir el ejercicio. Por ejemplo, si el sistema detecta un codo fuera de los márgenes (el paciente está doblando el brazo), el sistema le pide al paciente que extienda completamente el brazo. Para los registros de sesión, se interrumpe la repetición y se anota el ángulo alcanzado en el momento de la interrupción. Estos márgenes permanecen virtualmente unidos al paciente, por lo que si el paciente se mueve (dentro de límites aceptables), los márgenes se actualizan de acuerdo con las nuevas coordenadas de la articulación.

Como tercera tarea se tiene la **monitorización de las articulaciones**. Kinect proporciona coordenadas de unión de alta precisión 30 veces por segundo. La precisión de cada valor de coordenadas está representada por más de 20 decimales: el simple hecho de respirar hace que cambien las posiciones de las articulaciones. Afortunadamente, tal alta precisión no es necesaria para monitorizar los ejercicios de rehabilitación, por lo que se adoptó una precisión menor de tres decimales después de demostrar que es suficiente para detectar cambios significativos. De esta manera, la complejidad de los datos y el software se redujo sin perder efectividad.

Finalmente, la última tarea consiste en el **manejo de oclusiones**. Los ejercicios de abducción son muy fáciles de controlar, ya que todas las articulaciones del brazo permanecen visibles durante todo el tiempo de ejecución. Por el contrario, la flexión podría implicar la oclusión de la articulación o la pérdida de seguimiento para un pequeño rango de ángulos, donde las articulaciones están alineadas con el sensor. En estos casos, Kinect proporciona estimaciones de las posiciones de las articulaciones ocluidas. Para cuando la articulación vuelva a ser visible, podemos asegurar su posición. Lidar con esta situación es simple y efectivo. Si las posiciones reales de la articulación ocluida justo antes y

después de la oclusión eran correctas, entonces se puede suponer que la articulación mantuvo las posiciones correctas mientras estaba ocluida. De lo contrario, en caso de que la articulación hubiera roto la alineación, el sensor la habría detectado nuevamente y su posición real se evaluaría con respecto a los márgenes de tolerancia.

3.3 Interfaz de Usuario

De cara a la interfaz de usuario del sistema, se han utilizado solo tres colores (blanco, verde y gris), además de un cuarto (naranja) en contadas ocasiones. Por un lado, se tienen las pantallas de información de los ejercicios que el paciente debe llevar a cabo en el proceso de rehabilitación. Estas pantallas se han dividido en cuanto a diseño en cuatro columnas, de forma que la descripción del ejercicio estará en las dos o tres de la derecha (dependerá de la pantalla concreta), y la información general estará a la izquierda. Dos ejemplos de estas pantallas están en las figuras 2 y 3.

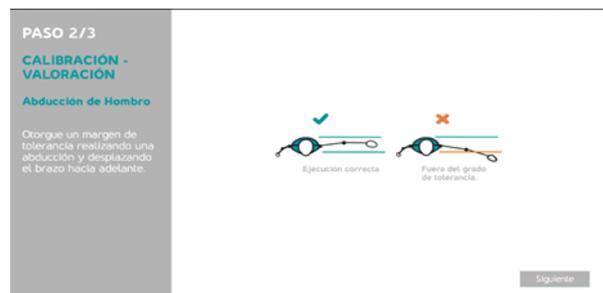


Figura 2. Pantalla de calibración.



Figura 3. Explicación de un ejercicio.

Por otro lado, se tiene la ejecución de los ejercicios gamificados en sí. En la figura 4 podemos ver un primer ejemplo de ejercicio, que consiste en mantener el brazo en una posición de 90° sujetando un peso durante 35 segundos. La gamificación en esta actividad ha consistido en que se cocina un pollo en una barbacoa. Como puede observarse, se sigue un enfoque de realidad aumentada, ya que los elementos del pollo y la barbacoa se superponen en la imagen a la imagen real captada por el sistema.



Figura 4. Ejecución de una actividad (1).

Otro ejemplo de ejercicio es el de la figura 5. En este caso, se trata del juego de ejecución de ejercicios concéntricos que se mencionó en la sección 3.2.



Figura 5. Ejecución de una actividad (2).

Siguiendo dentro de la gamificación de los ejercicios enfocados en el tren superior, podemos ver el desarrollo de juegos más elaborados en el apartado gráfico. En la figura 6 podemos ver una guerra de barcos pirata, en la cual la realización de una ejecución correcta del ejercicio hará que nuestro barco dispare contra el enemigo, en caso contrario, seremos nosotros los que recibamos el impacto del barco contrario. La ejecución del ejercicio consiste en el movimiento del hombro dentro del plano horizontal sin mover ninguna otra parte del cuerpo.

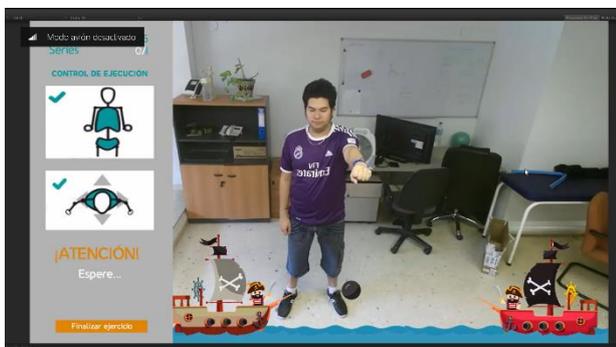


Figura 6. Ejecución de una actividad (3).

Finalmente, en la figura 7 la actividad consiste en intentar aproximar lo máximo posible las escápulas, sin mover

ninguna parte más del cuerpo, y mantener esa posición durante el tiempo establecido previamente por el fisioterapeuta. En este caso, se contabiliza el tiempo correcto manteniendo esa postura. La gamificación consiste en el lanzamiento de una piedra mediante una catapulta contra un castillo. En función del tiempo correcto de ejecución la catapulta imprimirá más o menos potencia a la piedra, pudiendo incluso no impactar la piedra contra el castillo en el caso de que no se haya ejecutado el movimiento correctamente el tiempo mínimo necesario.

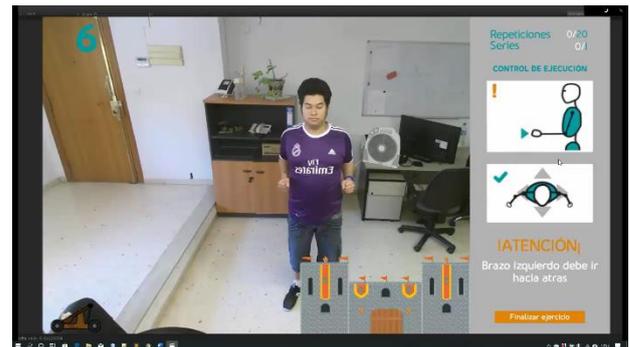


Figura 7. Ejecución de una actividad (4).

Después de realizar cada actividad, el paciente verá una pantalla con la puntuación que ha obtenido. La puntuación se mostrará mediante una escala de estrellas, completando así la gamificación de la actividad.

3.4 Problemas encontrados

A lo largo del desarrollo de la aplicación nos hemos encontrado con varios problemas que hemos tenido que solventar. Uno de los principales problemas ha sido la necesidad que poseen los fisioterapeutas en el control del ejercicio, ya que la precisión de la realización de los mismos es un objetivo fundamental en el tratamiento de terapia física.

Por parte de Kinect no es un problema el seguimiento de las articulaciones, ya que nos da una precisión de hasta 20 decimales. En nuestro caso el simple hecho de respirar nos da variaciones en los datos que se capturan y que en determinadas ocasiones pueden provocar resultados que indican que el ejercicio está mal ejecutado cuando en realidad no es así.

Para ello, comparamos las longitudes y los grados de la articulación dentro de todo el recorrido comparándolo en tiempo real con el establecido inicialmente en la valoración. Además, se controlan otras articulaciones que, aunque no tienen funcionalidad dentro del ejercicio de rehabilitación, si se produce un movimiento no permitido también es necesario avisar al paciente de que no debe hacerlo. Un ejemplo de ello es la inclinación del tronco del paciente en las

elevaciones de los hombros, evitando así que se ayude con dicha inclinación para la ejecución del movimiento requerido.

Otro problema encontrado, en la línea de lo que acabamos de comentar, es el que abarca los errores de reconocimiento de las articulaciones que se generan si en algún momento dentro del trazo del movimiento el dispositivo pierde un punto de control de la articulación, ya que en ese caso dibuja la posición de esa articulación en base a una estimación de dónde se debería encontrar, concurriéndose así en un error inaceptable para nuestro objetivo.

4. Validación Inicial

Para comenzar a comprobar la validez del enfoque propuesto, la primera actividad que se ha llevado a cabo es un cuestionario de aceptación de tecnología basado en el modelo TAM (Davis, 1989). Al tratarse de una validación muy preliminar, se ha conformado un cuestionario reducido de cinco ítems, dos de ellos referidos a la utilidad percibida del sistema y los otros tres a su facilidad percibida de uso, para comprobar así esos dos conceptos que están presentes en el modelo TAM. Cada ítem se ha valorado con una puntuación de 1 a 7, siendo 1 el valor menor y 7 el mayor. Los cuestionarios han sido cumplimentados por traumatólogos, rehabilitadores y fisioterapeutas hasta un total de 6 personas. Más adelante se realizará este mismo cuestionario por más personas de esas y otras profesiones realizadas en el proceso de rehabilitación. Los resultados de dicho cuestionario se muestran en la tabla 1. En ella, se detallan los resultados de las dos preguntas de utilidad percibida (UP1 y UP2) y de las tres preguntas sobre facilidad de uso percibida (FUP1, FUP2 y FUP3).

Tabla 1: Resultados del cuestionario de aceptación

	UP1	UP2	FUP1	FUP2	FUP3
Sujeto 1	5	5	7	7	7
Sujeto 2	7	7	7	7	7
Sujeto 3	7	7	7	7	7
Sujeto 4	6	6	7	7	7
Sujeto 5	6	6	6	6	6
Sujeto 6	5	5	6	6	6

Se observa cómo el valor de los resultados de las dos preguntas referidas a la utilidad percibida se ubica en torno al 6, mientras que el valor de los resultados de las tres preguntas sobre la facilidad percibida de uso es de 7 (el máximo) en la mayoría de los casos y de 6 en el resto. Por lo tanto, y a pesar de que somos conscientes de que se trata de una muestra pequeña y de una validación muy preliminar, estos resultados parecen validar nuestro enfoque y nos animan a continuar probando y validando nuestro sistema.

Además de esta validación, en un trabajo paralelo se han medido la usabilidad y el *flujo* en el uso de la herramienta mediante sendos cuestionarios que han dado buenos valores de aceptación (Fuertes et al., 2019a). En concreto, en dicho trabajo se realizó un estudio de uso con 10 pacientes de entre 38 y 83 años, con una edad media de 54,8 años, que padecían de lesiones de los miembros superiores como luxaciones o tendinopatías. Todos ellos utilizaron la herramienta durante tres semanas, dos veces a la semana, siendo un total por lo tanto de seis usos de la herramienta. Para evaluar aspectos relacionados con la usabilidad y la inmersión en el juego (el concepto de *flujo*), los participantes rellenaron unos cuestionarios de 16 preguntas con cuestiones obtenidas del cuestionario SUS de análisis de la usabilidad (Brooke, 1996) y también con las cuestiones usadas por Shin et al. (2014) para el estudio del flujo en un sistema de rehabilitación similar a este, siendo cuestiones adaptadas de las propuestas por Park et al. (2010). Todas esas cuestiones se unieron en un único cuestionario en el cual las preguntas debían ser valoradas con valores de 1 a 5. En cuanto a la parte del SUS, la puntuación obtenida fue de 84,5 sobre 100, lo cual entendemos que nos refuerza en nuestra idea de que el sistema desarrollado es usable. En lo que se refiere a la otra parte del cuestionario, ésta realmente mide tres ítems distintos. En el ítem referido a la atención no se obtuvieron los valores deseados (2,75 sobre 5 de media de las dos preguntas), lo cual indica que el juego podría mejorar en cómo mantener la atención del usuario. En la parte de interés intrínseco sí que se recibieron buenos valores, al igual que en los ítems relativos al control, con lo cual estos aspectos podríamos darlos en principio por bien implementados en el sistema.

5. Conclusiones y trabajo futuro

El trabajo realizado hasta ahora ha sido la búsqueda del equilibrio entre la usabilidad del usuario paciente con el sistema, junto con la precisión y utilidad que requiere el trabajo de los profesionales de la rehabilitación. Por ese motivo la elaboración de distintos juegos para cada uno de los ejercicios que se pueden ejecutar con el fin de conseguir el paciente tenga un estímulo añadido para llevar a cabo una rehabilitación correcta y que además le permita conocer en tiempo real cómo está siendo dicha rehabilitación. Así pues, y tras el estudio breve de usabilidad que hemos realizado, estudiando los resultados obtenidos, concluimos que nos encontramos que nuestro enfoque es el adecuado, pues los resultados así nos lo muestran.

Como hemos comentado en el apartado anterior, nos encontramos en pleno proceso de evaluación del sistema, de cara también a futuras mejoras. El siguiente paso será conformar un panel de pacientes con lesiones de los

miembros superiores, como luxaciones articulares, tendinopatías o pinzamientos, para que hagan uso de la herramienta de cara a que se pruebe la validez de la herramienta en cuanto a mejora del rendimiento alcanzado por los pacientes.

En cuanto a posibles mejoras del sistema que se están valorando, se pretende que en un futuro se pueda dar la opción de seleccionar varios juegos distintos o la elección de un entorno más aséptico, sin entorno gamificado, todo ello a elección del paciente.

Referencias

- Alankus, G., Lazar, A., May, M., & Kelleher, C. (2010). Towards Customizable Games for Stroke Rehabilitation. CHI 2010: Therapy and Rehabilitation.
- Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. Usability evaluation in industry, 189(194), 4-7.
- Chang, Y.J., Chou, L.D., Wang, F.T.Y., & Chen, S.F. (2011). A Kinect-based vocational task prompting system for individuals with cognitive impairments, Personal and Ubiquitous Computing. <http://dx.doi.org/10.1007/s00779-011-0498-6>.
- Davis, F.D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS Quarterly 13 (3): 319-340
- Flynn, S.M., & Lange, B.S. (2010) Games for the rehabilitation: the voice of the players. In: International Conference on Disability, Virtual Reality & Associated Technologies (ICDVRAT 2010), pp. 185–194
- Fuertes, G., Gallardo, J., & Mollineda, R. (2019a) Usability Study of a Kinect-Based Rehabilitation Tool for the Upper Limbs. In: Rocha Á., Adeli H., Reis L., Costanzo S. (eds) New Knowledge in Information Systems and Technologies. WorldCIST'19 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 931. Springer, Cham
- Fuertes, G., Mollineda, R., Gallardo, J., & Pla, F. (2019b). A RGBD-Based Interactive System for Gaming-Driven Rehabilitation of Upper Limbs. Sensors 19(16), 3478.
- Funaya, H., Shibata, T., Wada, Y., & Yamanaka, T. (2013). Accuracy assessment of Kinect body tracker in instant posturography for balance disorders. In: Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 2013 7th International Symposium on, pp. 213–217. doi: 10.1109/ISMICT.2013.6521731 . Tokyo.
- Galna, B., Barry, G., Jackson, D., Mhiripiri, D., Olivier, P., & Rochester, L. (2014). Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease. Gait Posture 39 (4), 1062–1068. doi: 10.1016/j.gaitpost.2014.01.008
- Gil-Gómez, J., Lloréns, R., Alcañiz, M. et al. (2011) Effectiveness of a Wii balance board-based system (eBaViR) for balance rehabilitation: a pilot randomized clinical trial in patients with acquired brain injury. J NeuroEngineering Rehabil 8, 30
- Ibarra Zannatha, J.M., Malo Tamayo, A.J., Gómez Sánchez, A.D., Lavín Delgado, J.E., Rodríguez Cheu, L.E., & Sierra Arévalo, W.A. (2013). Development of a system based on 3D vision, interactive virtual environments, ergonomic signals and humanoid for stroke rehabilitation, Computer Methods and Programs in Biomedicine 112 (2) 239–249.A
- Lang, C., MacDonald, J., & Gnip, C. (2007). Counting repetitions: An observational study of outpatient therapy for people with hemiparesis post-stroke. Journal of Neurologic Physical Therapy, 31, 3–10.
- Linhares, S.G.D., Pereira, J.C.D.N., Fernandes, P.M.P., & de Campos, J.R.M. (2017). Functional exercise capacity and lung function in patients undergoing an early rehabilitation program after the Nuss procedure: a randomized controlled trial. Pediatric surgery international, 33(1), 69-74.
- Lloyd-Jones, D., Adams, R., Brown, T., Carnethon, M., Dai, S., De Simone, G., et al (2010). Heart disease and stroke statistics—2010 update: A report from the American Heart Association. Circulation, 121, 46–215.
- Lozano-Quilis, J.A., Gil-Gómez, H., Gil-Gómez, J.A., Albiol-Pérez, S., Palacios-Navarro, G., Fardoun, H.M., & Mashat, A.S. (2014). Virtual rehabilitation for multiple sclerosis using a kinect-based system: randomized controlled trial. JMIR serious games, 2(2), e12.
- Mehboob, H., Kim, J., Mehboob, A., & Chang, S.H. (2017). How post-operative rehabilitation exercises influence the healing process of radial bone shaft fractures fixed by a composite bone plate. Composite Structures, 159, 307-315.
- Microsoft, Kinect for Windows SDK 2.0. [Online] Available: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=44561>. [Accessed: 14 March 2019].
- Montagnini, M., Javier, N.M., & Ritchie, C. (2017). Physical therapy and other rehabilitation issues in the palliative care setting. UpToDate May, 16.
- Muñoz, J., Henao, O., López, J., & Villada, J. (2013) BKI: Brain Kinect Interface, a new hybrid BCI for rehabilitation. In: Schouten B., Fedtke S., Bekker T., Schijven M., Gekker A. (eds) Games for Health. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Napoli, A., Glass, S., Ward, C., Tucker, C., & Obeid, I. (2017). Performance analysis of a generalized motion capture system using microsoft kinect 2.0. Biomedical Signal Processing and Control, 38, 265-280.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, la Agencia Española de Investigación y la Unión Europea (FEDER) mediante el proyecto RTI2018-096986-B-C31, y por el Gobierno de Aragón y la Unión Europea mediante el FEDER 2014-2020 "Construyendo Europa desde Aragón" (Grupo T25_17D).

- Nguyen, A.V., Ong, Y.L.A., Luo, C.X., Thuraisingam, T., Rubino, M., Levin, M.F., & Archambault, P.S. (2019) Virtual reality exergaming as adjunctive therapy in a sub-acute stroke rehabilitation setting: Facilitators and barriers. *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, 14, 317–324
- Obdrzalek, S., Kurillo, G., Ofli, F., Bajcsy, R., Seto, E., Jimison, H., & Pavel, M. (2012). Accuracy and robustness of Kinect pose estimation in the context of coaching of elderly population. In: *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE*, pp. 1188–1193. doi: 10.1109/EMBC.2012.6346149 . San Diego, CA.
- Park, J., Parsons, D., & Ryu, H. (2010) To flow and not to freeze: Applying flow experience to mobile learning. *Learn Tech, IEEE Trans* 3(1):56-67.
- Pastor, I., Hayes, H., & Bamberg, S. (2012). A Feasibility Study of an Upper Limb Rehabilitation System Using Kinect and Computer Games. 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS.
- Richards, S.B., Taylor, R.L., Ramasamy, R., & Richards, R.Y. (1999). *Single subject research: Applications in educational and clinical settings*. New York: Wadsworth Shaughnessy, M., Resnick, B., & Macko, R. (2006). Testing a model of post-stroke exercise behavior. *Rehabilitation Nursing*, 31, 15–21.
- Sáenz-de-Urturi, Z., García Zapirain, B., & Méndez Zorrilla, A. (2015). Elderly user experience to improve a Kinect-based game playability. *Behaviour & Information Technology*, 34(11), 1040-1051
- Saposnik, G., Teasell, R., Mamdani, M., Hall, J., McLroy, W., Cheung, D., Thorpe, K.E., Cohen, L.G., & Bayley, M.E. (2010). Effectiveness of virtual reality using Wii gaming technology in stroke rehabilitation: a pilot randomized clinical trial and proof of principle. *Stroke* 41 (7), 1477–1484.
- Shin, J.H., Ryu, H., & Jang, S.H. (2014). A task-specific interactive game-based virtual reality rehabilitation system for patients with stroke: a usability test and two clinical experiments. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 11(1), 32.
- Venugopalan, J., Cheng, C., Stokes, T.H., & Wang, M.D. (2013). Kinect-based rehabilitation system for patients with traumatic brain injury. In 2013 35th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society (embc) (pp. 4625-4628). IEEE
- Webster, D., & Celik, O. (2014). Experimental evaluation of Microsoft Kinect 's accuracy and capture rate for stroke rehabilitation applications. In: *Haptics Symposium (HAPTICS), 2014 IEEE*, pp. 455–460. doi: 10.1109/HAPTICS.2014.6775498 . Houston, TX.
- Wollersheim, D., Merkes, M., Shields, N., Liamputtong, P., Wallis, L., Reynolds, F., & Koh, L. (2010). Physical and psychosocial effects of Wii video game use among older women. *International Journal of Emerging Technologies and Society*, 8(2), 85–98
- Yang, Y., Fang, P., Yan, L., Shuyu, L., Yubo, F., & Deyu, L. (2014). Reliability and validity of Kinect RGB-D sensor for assessing standing balance. *Sensors J, IEEE* 14, 1633–1638. doi: 10.1109/JSEN.2013.22