

Aplicación de la realidad virtual en los aspectos motores de la neurorrehabilitación

Benito Peñasco-Martín, Ana de los Reyes-Guzmán, Ángel Gil-Agudo, Alberto Bernal-Sahún, Beatriz Pérez-Aguilar, Ana Isabel de la Peña-González

Introducción. La realidad virtual permite al usuario interactuar con elementos dentro de un escenario simulado. Recientemente, estamos asistiendo a la introducción de dispositivos basados en realidad virtual como una de las novedades más relevantes en la neurorrehabilitación.

Objetivo. Revisar las aplicaciones clínicas de los desarrollos basados en realidad virtual para el tratamiento neurorrehabilitador de los procesos discapacitantes de origen neurológico más habituales en sus aspectos motores.

Desarrollo. Se revisaron las bases de datos Medline, Physiotherapy Evidence Database, Ovid y la Biblioteca Cochrane hasta abril de 2009. Se completó con una búsqueda en la web a través de Google. Todavía no se ha podido identificar ningún ensayo clínico sobre su eficacia. La información recogida se basa en la descripción de los distintos prototipos efectuada por los respectivos grupos que han participado en su desarrollo. En la mayor parte de los casos, se trata de experiencias clínicas con un número reducido de pacientes, que se han encaminado más bien a comprobar el buen funcionamiento y validez del dispositivo que a demostrar su eficacia clínica. Aunque la mayoría de las aplicaciones clínicas se refieren a pacientes con ictus, también se han encontrado aplicaciones para pacientes con lesión medular, esclerosis múltiple, enfermedad de Parkinson o alteraciones del equilibrio.

Conclusiones. La realidad virtual se presenta como una herramienta novedosa y de gran proyección en la neurorrehabilitación. Son necesarios estudios futuros que avalen su eficacia clínica frente a las técnicas tradicionales.

Palabras clave. Equilibrio. Ictus. Lesión medular. Parkinson. Realidad virtual. Rehabilitación.

Introducción

A lo largo de los últimos años, el avance de las tecnologías de la información (TIC) ha supuesto un profundo cambio en diferentes ámbitos de nuestra vida, tanto que a día de hoy resulta difícil imaginarnos cómo sería ésta sin ordenadores o teléfonos móviles, por ejemplo. Dentro del campo de la medicina, el cambio inducido por la incorporación de las TIC no ha sido menor, ya que éstas se han aplicado con fines tan diversos como la historia clínica electrónica, la telerrehabilitación [1] o, como en el caso que nos ocupa en este artículo, la neurorrehabilitación mediante realidad virtual (RV).

La RV es una simulación de un entorno real generada por ordenador en la que, a través de una interfaz hombre-máquina, se va a permitir al usuario interactuar con ciertos elementos dentro del escenario simulado. Al hablar de RV hay que tener en cuenta dos conceptos importantes, como interacción e inmersión. Interacción, ya que la realidad virtual no supone una visualización pasiva de la representación gráfica, sino que la persona puede interactuar con el mundo virtual en tiempo real; e inmersión, porque a través de determinados dispositivos una

persona tiene la sensación de encontrarse físicamente en el mundo virtual. Existe una gran variedad de interfaces para interactuar con el entorno virtual, que comprenden desde los dispositivos más comunes, como un ratón, un teclado o un *joystick*, hasta complejos sistemas de captura de movimiento o dispositivos hápticos que pueden proporcionar un *feedback* táctil y darle al usuario la sensación de que está manipulando objetos reales [2].

Tres elementos clave en la neurorrehabilitación son la repetición, el *feedback* y la motivación del paciente. La repetición es importante para el aprendizaje motor y para que tengan lugar los cambios corticales que los originan, pero no es la repetición por sí sola la que causa el aprendizaje motor, sino que debe ir ligada a un *feedback* sensorial sobre el resultado de cada una de las realizaciones [3]. Por otro lado, para realizar una y otra vez las actividades requeridas para la neurorrehabilitación, es fundamental la motivación del sujeto, que se consigue al enfocar las diferentes actividades que conforman la terapia como un videojuego, de forma que las sesiones de tratamiento sean mucho más amenas y atractivas [3].

El uso de aplicaciones de RV como complemento a la terapia supone, además, otras importantes

Unidad de Biomecánica y Ayudas Técnicas; Hospital Nacional de Parapléjicos; SESCAM (B. Peñasco-Martín, A. de los Reyes-Guzmán, A. Gil-Agudo, A. I. de la Peña-González); Toledo. Indra Sistemas, S.A. (A. Bernal-Sahún, B. Pérez-Aguilar); Alcobendas, Madrid, España.

Correspondencia:

Dr. Ángel Gil Agudo. Unidad de Biomecánica y Ayudas Técnicas. Hospital Nacional de Parapléjicos. Finca La Peraleda, s/n. E-45071 Toledo.

Fax:

+34 925 247 745.

E-mail:

amgila@sescam.jccm.es

Agradecimientos:

A la Fundación Rafael del Pino por su interés y colaboración en esta materia.

Aceptado tras revisión externa:

28.05.10.

Cómo citar este artículo:

Peñasco-Martín B, De los Reyes-Guzmán A, Gil-Agudo A, Bernal-Sahún A, Pérez-Aguilar B, De la Peña-González AI. Aplicación de la realidad virtual en los aspectos motores de la neurorrehabilitación. Rev Neurol 2010; 51: 481-8.

© 2010 Revista de Neurología

ventajas, como son la posibilidad de controlar de forma precisa y repetible cada una de las sesiones, la capacidad de adaptar las interfaces a las limitaciones motoras del usuario, la recreación de entornos virtuales seguros para practicar habilidades con un riesgo potencial en el mundo real y la posibilidad de desarrollar plataformas de telerrehabilitación [1], donde médicos y terapeutas puedan seguir de forma remota la evolución del paciente a partir de los datos registrados durante cada una de las sesiones de terapia [4].

A pesar de todas estas ventajas, se plantea una serie de dudas a la hora de aplicar la RV a la neurorehabilitación: ¿son equivalentes los movimientos realizados en entornos virtuales y reales?; ¿pueden estas actividades mejorar la capacidad motora de los pacientes?; y, por último, ¿va a ser posible transferir las nuevas habilidades adquiridas mediante la práctica en entornos virtuales a un entorno real? Acerca de la primera de estas cuestiones, varios estudios han llegado a la conclusión de que los movimientos son suficientemente similares como para considerarlos adecuados para la neurorehabilitación, aun cuando se han apreciado algunas diferencias debidas a la diferente percepción espacial en los entornos físico y virtual, resultando trayectorias menos precisas y movimientos más lentos [5-7]. En cuanto a la segunda cuestión, se han obtenido resultados satisfactorios en numerosos estudios, como se verá de forma más detallada; además, algunos trabajos sugieren que la neurorehabilitación mediante RV podría inducir reorganización cortical, la cual desempeña un papel fundamental en la recuperación de la capacidad motora [3,8]. Finalmente, sobre la transferencia a entornos reales de las habilidades adquiridas, también se han obtenido buenos resultados en varios estudios [3,9-11]. Por tanto, a la vista de los resultados positivos obtenidos hasta el momento, podemos considerar la RV una herramienta aplicable para la neurorehabilitación.

El objetivo de este artículo es hacer una revisión sobre el estado del arte en el campo de la neurorehabilitación mediante RV, poniendo especial énfasis en aquellas experiencias que hayan demostrado una aplicación clínica. Para ello, se han agrupado según las diferentes patologías.

Estrategia de búsqueda

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica, sin restricción de idiomas, hasta abril de 2009, en las siguientes bases de datos: Medline, Physiotherapy Evidence Database, Ovid y la Biblioteca Cochrane. Los

términos empleados fueron *virtual reality, rehabilitation, ictus, spinal cord injury, Parkinson disease y balance*. Se completó con una búsqueda manual en las principales revistas de ingeniería de rehabilitación y se revisó en la web a través de Google.

Síntesis de resultados

A continuación se presentan las experiencias más relevantes de la aplicación de la RV en el proceso neurorehabilitador de las siguientes patologías.

Ictus

Uno de los procesos discapacitantes de origen neurológico que más frecuentemente presenta secuelas susceptibles de incluirse en un programa de neurorehabilitación es el ictus. Varias son las aportaciones recogidas, y existen diferentes enfoques del problema.

El grupo de la Universidad Rutgers (Nueva Jersey, EE. UU.) ha trabajado en el desarrollo de numerosas aplicaciones en pacientes con ictus mediante RV, centrándose principalmente en las alteraciones motoras de la mano. Este grupo utiliza los equipos CyberGlove[®] para las aplicaciones en las que necesita monitorizar la posición de la mano y obtener datos cinemáticos, y el Rutgers Master II [12], que proporciona un *feedback* háptico al usuario, permitiendo, además, la obtención de información sobre la fuerza ejercida. Los diferentes ejercicios que han desarrollado están destinados a la mejora de cuatro parámetros: el rango de movimiento de los dedos, la velocidad, el fraccionamiento (capacidad de mover los dedos de forma independiente) y la fuerza [13].

En un primer estudio se usó este sistema, combinado con la terapia tradicional, durante un período de nueve días (cinco horas de terapia al día, de las cuales 1,5 horas eran con RV). En el estudio participaron tres pacientes que mejoraron en los cuatro parámetros entrenados [14]. El problema es que se aplican dos tratamientos simultáneamente, de forma que resulta difícil valorar el efecto de la RV.

En un estudio posterior con ocho participantes, se utilizó únicamente el sistema de RV [15]. La duración del tratamiento fue de tres semanas, con un total de 13 sesiones de terapia de entre 2 y 2,5 horas. Para evaluar la mejora de los pacientes se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos los dos primeros y los dos últimos días. Además, se realizó una valoración funcional de cada uno de los pacientes mediante el test de Jebsen [16], y una prueba para comprobar la transferencia de las habilidades al mundo real.

En cuanto a la neurorrehabilitación del brazo, el grupo de Rutgers también ha desarrollado un sistema de RV, el *Rutgers Arm* [17], compuesto por un PC, el equipo de captura de movimiento *Fastrak* [18], una mesa con un reposabrazos diseñada específicamente para esta aplicación, y una base de datos donde se almacenan los resultados. Se han creado dos juegos terapéuticos. El primero está destinado a mejorar el control motor del hombro. Se trata de una representación virtual de la mesa en la que aparece una bola que hay que mover hasta un cierto objetivo; siguiendo una trayectoria dada, la bola y el objetivo aparecen en distintas configuraciones para practicar diferentes movimientos. El segundo juego, que pretende mejorar la coordinación entre la mano y el ojo y reducir el tiempo de reacción, es una adaptación de un conocido juego Arcade (*Breakout*) que consiste en romper una serie de bloques situados en la parte superior de la pantalla con una bola. El usuario debe mover una pala para evitar que la bola salga por la parte inferior de la pantalla. Este sistema ha sido probado en un estudio piloto con un único paciente durante cinco semanas (tres sesiones por semana), de las cuales las cuatro primeras fueron presenciales y la última fue a distancia, mediante telerrehabilitación [19]. Para valorar la evolución, se realizó al paciente el test de Fugl-Meyer [20] antes y después de las 12 sesiones de terapia presenciales, obteniendo una mejora de siete puntos en la valoración del miembro rehabilitado y de cuatro puntos en el rango de movimiento del hombro.

Este grupo también ha desarrollado un dispositivo para neurorrehabilitación de las extremidades inferiores, el *Rutgers Ankle* [21], que consiste en una plataforma que proporciona seis grados de libertad y puede generar fuerzas que se oponen al movimiento del pie del paciente. Se han desarrollado dos juegos: en uno de ellos, el paciente controla un avión con el movimiento de su pie y debe guiarlo a través de unas ventanas cuadradas que van apareciendo en pantalla; en el segundo, controla una lancha y el objetivo es ir esquivando boyas. Este sistema se ha probado en un estudio piloto con tres pacientes, mostrando todos ellos un aumento en la fuerza generada al realizar los movimientos, así como en la velocidad de la marcha [21].

También se ha planteado una modificación del *Rutgers Ankle* para que pueda aguantar pesos mayores y, así, mediante el uso de dos plataformas, utilizarlo para rehabilitación de la marcha [22].

El grupo del Instituto Tecnológico de Massachusetts fue el primero en obtener resultados positivos aplicando la RV a la neurorrehabilitación. Han desarrollado un sistema basado en el aprendizaje por

imitación, en el cual aparece un profesor virtual realizando los movimientos que debe imitar el paciente. El sistema cuenta con aproximadamente 20 escenas que representan diferentes tareas y cada una de ellas tiene varios niveles de dificultad [3].

En el primer estudio de este grupo, el propósito era determinar si era posible utilizar la RV para la rehabilitación del ictus [23]. En dicho estudio participaron dos sujetos, en 16 sesiones de terapia de una hora, con una o dos sesiones por semana. Ambos participantes mostraron progresos significativos: según el test de Fugl-Meyer [20], el primero mejoró su resultado un 17% y el segundo un 5%.

En un segundo estudio se analizó con mayor profundidad la generalización de las habilidades adquiridas en el entrenamiento en el entorno virtual a actividades similares en entornos reales [24,25]. El estudio se hizo con siete sujetos entrenados en dos escenarios virtuales (30 sesiones de una hora, tres sesiones por semana). Además de la transferencia de las habilidades entrenadas a entornos reales, la evolución de los pacientes se midió mediante el test de Fugl-Meyer [20] y el *Wolf Motor Test* [26] para extremidades superiores. Cinco de los siete participantes mostraron claras evidencias de generalización de las capacidades adquiridas con el entrenamiento a otros entornos, mientras que los siete obtuvieron resultados significativamente mayores en los dos test funcionales.

El grupo de la Universidad de Nottingham ha desarrollado un sistema de neurorrehabilitación enfocado en el entrenamiento de actividades de la vida diaria [27,28], como, por ejemplo, preparar una bebida caliente. Para ello, crearon una interfaz tangible con una serie de objetos reales instrumentados con sensores, lo que les permite introducirlos en el entorno virtual, de manera que los pacientes practican en un entorno simulado, pero manejando objetos reales. Se ha hecho un estudio piloto sobre la usabilidad del sistema con siete pacientes con ictus, pero su efectividad aún no se ha demostrado [28].

En la Universidad de Chicago se han centrado en la neurorrehabilitación de la mano [29-31]. El sistema que han desarrollado cuenta con unas gafas de RV y dos diferentes ortesis mecanizadas para asistir el movimiento de la mano afectada del usuario. Se ha efectuado un estudio con tres pacientes para probar el equipo (sesiones de 30 minutos tres veces a la semana durante seis semanas). Uno de los pacientes recibió las sesiones de terapia únicamente con RV y los otros dos combinando la RV con el uso de las ortesis asistivas. Para medir la evolución de los pacientes, se realizaron los test funcionales Rancho [32] y *Box & Blocks* [33] antes y después de las seis

semanas. Además, se midieron la velocidad angular pico y el rango de movimiento durante la apertura de la mano. El paciente que recibió las sesiones de RV sin guante no mostró mejoras en los test funcionales, aunque sí en la velocidad pico y en el rango de movilidad. De los otros dos pacientes, uno mejoró en los dos test funcionales, mientras que el otro obtuvo un mejor resultado en uno de los test.

En la Universidad de California del Sur han desarrollado un sistema para la rehabilitación de las extremidades superiores en el que utilizan gafas de RV, sensores electromagnéticos para capturar el movimiento del paciente y dos equipos PHANTOM [34] para proporcionarle un *feedback* táctil. El sistema se ha probado en un estudio piloto con dos pacientes (12 sesiones de 1-2 horas durante tres semanas), los cuales mostraron mejoras tras la terapia [35].

Un grupo en la Universidad de Zúrich ha propuesto un sistema de neurorrehabilitación similar en cuanto a funcionamiento al *Rutgers Arm*, con la diferencia de que, en este caso, los dos brazos del paciente están representados en el escenario virtual. Se ha realizado un estudio con seis pacientes (sesiones de 45 minutos al día cinco días a la semana, con una duración máxima de cinco semanas) con el fin de probar la usabilidad del sistema y su eficacia potencial, y descartar efectos adversos. A pesar de que se observaron progresos en los pacientes, el objetivo del estudio no era establecer la eficacia terapéutica, por lo que no se presentan muchos datos acerca de dichos progresos [36].

Un equipo de investigadores de la Universidad del Ulster ha estado trabajando en un sistema de neurorrehabilitación de los miembros superiores que consta de gafas de RV y sensores electromagnéticos para monitorizar el movimiento del paciente. Se ha hecho un estudio piloto con 10 sujetos sanos y cinco con ictus para probar el sistema, pero su efectividad aún no se ha demostrado [37].

Otros grupos han optado por utilizar consolas de videojuegos comerciales, como la Nintendo Wii o la Sony PlayStation II con EyeToy, y probar su potencial en el campo de la neurorrehabilitación. Un estudio realizado en la Universidad de Ankara ha obtenido buenos resultados comparando la evolución de dos grupos de 10 pacientes. Uno de dichos grupos recibía sesiones de terapia convencionales combinadas con terapia virtual con PlayStation EyeToy, y el otro recibía las mismas sesiones de terapia convencional combinadas con una terapia virtual placebo; el grupo que recibía las sesiones de terapia con RV mostró una mejora significativamente mayor que el grupo control [38]. También se han obtenido resultados positivos con la Nintendo Wii con

Wii Fit para la rehabilitación del ictus. En un estudio piloto en la Universidad de Nueva Jersey se trató a dos pacientes durante 12 sesiones de una hora, uno de ellos con terapia convencional y el otro con Wii, y se comprobó que la evolución del paciente que recibía terapia virtual fue mayor en casi todos los parámetros medidos [39].

Lesión medular

Aunque la mayoría de estudios en el campo de la neurorrehabilitación con RV se ha centrado en el ictus, algunos investigadores han estudiado la aplicación de esta técnica a la rehabilitación en otras patologías, como la lesión medular.

Un equipo de las universidades de Hadaza y Haifa (Israel) ha desarrollado un sistema de neurorrehabilitación para lesionados medulares enfocado en la mejora del equilibrio. Para ello utilizan un equipo comercial de RV con captura de movimiento mediante cámaras de vídeo, el *GestureXtreme* de la empresa *GestureTek* [40], muy similar al *EyeToy* de Sony PlayStation. Con el fin de probar el sistema y establecer un protocolo de trabajo, en primer lugar se realizó una serie de pruebas con cinco lesionados medulares. En el estudio posterior participaron 13 sujetos, 12 de ellos con nivel de lesión medular entre T3 y L2, y uno con un cuadro de cauda equina [41]. Los resultados se compararon con los de un grupo de control formado por 12 sujetos sin lesión. En las sesiones de terapia se utilizaron tres diferentes entornos virtuales. En el primero aparece una serie de bolas en la pantalla que el paciente debe tocar con cualquier parte de su cuerpo, lo que hace que se transformen en pájaros o estallen y desaparezcan; en el segundo entorno el usuario es un portero de fútbol y debe evitar que los balones que van apareciendo entren en la portería; y en el tercer escenario el paciente puede verse a sí mismo haciendo *snowboard* y descendiendo una colina, y tiene que inclinarse hacia un lado u otro para evitar chocar con rocas y árboles. El estudio no ofrece datos sobre la evolución de los pacientes, únicamente nos muestra los resultados obtenidos en las sesiones de terapia comparados con los del grupo de control, y los correlaciona con el resultado de dos test funcionales de alcance [42,43] realizados tras dichas sesiones. Tampoco se dan datos sobre el número de sesiones a las que se sometió a los pacientes o su duración [41].

Un grupo del Instituto Auxológico Italiano ha estado trabajando en la rehabilitación de la marcha de lesionados medulares mediante RV. Para ello han creado un entorno virtual que simula una excursión

a la montaña y que han utilizado de forma conjunta con un exoesqueleto semirrígido encargado de soportar el tórax y las extremidades inferiores del paciente. Dicho exoesqueleto consta de una serie de actuadores activados por aire comprimido que mueven sus diferentes articulaciones de acuerdo con un determinado patrón de marcha. El sistema se ha probado en un estudio piloto con un único paciente. Los resultados que muestra el estudio se basan en las respuestas del paciente a un cuestionario realizado y no en datos objetivos acerca de su evolución [44,45].

Esclerosis múltiple

Un equipo de la Universidad Vita-Salute (Milán) ha hecho un estudio con 12 pacientes con esclerosis múltiple y un grupo control formado por 12 personas sin patología con el fin de determinar la efectividad de la terapia con RV en la neurorrehabilitación de la esclerosis múltiple. Los 12 pacientes seleccionados no presentaban discapacidades graves, ya que tenían un resultado por debajo de 6,5 en la *Expanded Disability Status Scale* [46]. En el escenario virtual aparecía un objetivo móvil al que el usuario debía apuntar con su dedo índice siguiendo su trayectoria. Para capturar el movimiento, se utilizó un sensor electromagnético de la compañía Polhemus [18] colocado sobre el dedo índice. Los participantes recibían un *feedback* visual en tiempo real, representándose la posición de su dedo en el escenario virtual, y podían apreciar la distancia de su dedo al objetivo. Se realizó una única sesión con cada uno de los sujetos. La evolución de los participantes se midió en función de la distancia media desde la trayectoria seguida hasta la trayectoria del objetivo. Se observó un aumento en la precisión de más de un 20% en nueve de los participantes del grupo de control y en cuatro del grupo con esclerosis múltiple [47].

Un grupo de la Universidad Clarkson (Nueva York, EE. UU.) ha planteado la aplicación de la RV a la neurorrehabilitación de la esclerosis múltiple, enfocándola a la mejora del equilibrio, de la marcha y de la resistencia. Con el fin de demostrar su eficacia, han realizado un estudio piloto con un único individuo con esclerosis múltiple con una valoración de 2,5 en la *Expanded Disability Status Scale* [46]. La duración del estudio fue de 12 semanas, con un total de 20 sesiones. El sistema empleado para mejorar la marcha y la resistencia consta de un tapiz rodante equipado con un sistema de seguridad encargado de soportar el peso del paciente y un entorno virtual dentro del cual el paciente puede desplazarse. En cada una de las sesiones de terapia, se hizo caminar al sujeto sobre el tapiz tres intervalos de cinco

minutos cada uno. Además del entrenamiento en el entorno virtual, se hacía al paciente recorrer distancias de unos 25 metros dentro de la clínica entre cuatro y seis veces por sesión. Para el entrenamiento del equilibrio se empleó el sistema de RV comercial IREX de GestureTek [40], que consta de una serie de juegos en los que el usuario debe inclinarse hacia uno u otro lado para parar balones, eliminar bolas de la pantalla o conducir un automóvil. Para medir la evolución del paciente se realizó, antes y después de las 12 semanas, una valoración funcional de sus extremidades inferiores y el test de Berg para el equilibrio [48]; además, se realizaron dos cuestionarios, uno para evaluar la fatiga y otro para valorar el equilibrio, el test ABC [49]. Tras finalizar las sesiones de terapia se observaron mejoras significativas en todos estos test. Además, se observaron mejoras en otros parámetros, como la velocidad de la marcha. Para comprobar la consistencia de los resultados obtenidos se volvió a evaluar al paciente dos meses después de finalizar la rehabilitación, obteniendo valores muy similares [50].

Enfermedad de Parkinson

Un equipo de investigadores de la Universidad de Washington ha estado trabajando en un sistema de realidad aumentada que, mediante la superposición de imágenes virtuales al mundo real, permita mitigar los efectos de la acinesia asociada a los pacientes con enfermedad de Parkinson sin necesidad de medicación. La idea en que se basa su sistema es el fenómeno denominado movimiento paradójico o *kinesia paradoxa*, que afecta a estos pacientes, algunos de los cuales son incapaces de andar, pero, paradójicamente, pueden dar pasos en presencia de pistas visuales colocadas en su camino. Para aprovechar este fenómeno han utilizado un visor con lentes de cristal líquido que permite superponer pistas virtuales al mundo real. Se ha comprobado que, para obtener resultados positivos, estas pistas deben ser estables y realistas, y su velocidad de movimiento debe adaptarse a la velocidad de cada paciente. Aunque se menciona que el prototipo se ha probado con varios pacientes, los artículos no dan datos específicos sobre los resultados [51,52].

Un grupo de Haifa (Israel) ha desarrollado un sistema muy similar que, en lugar de representar únicamente las pistas visuales, también representa un suelo de baldosas virtual sobrepuesto sobre el suelo real. Además, cuenta con acelerómetros, lo que permite al sistema responder al movimiento del usuario creando pistas visuales estables, independientemente del camino que éste tome y de su velo-

cidad de movimiento, así como adaptar la perspectiva a su punto de vista, dando una mayor sensación de realismo. El sistema se ha probado en un estudio con 14 pacientes, observándose una mejora media de un 26% en la velocidad y de un 31% en la longitud de la zancada. Además, se comprobó que, con la ayuda de las pistas visuales, incluso los pacientes con más dificultades para comenzar a andar eran capaces de iniciar la marcha por sí solos [53].

Equilibrio

Un equipo de la Universidad de Pittsburgh ha trabajado en un sistema para la neurorrehabilitación del equilibrio de pacientes con desórdenes vestibulares, al cual han denominado *Balance Near Automatic Virtual Environment* (BNAVE). El BNAVE es un sistema inmersivo con imágenes estereoscópicas, en el que se proyecta el entorno virtual sobre todo el campo de visión del paciente, quien se encuentra colocado sobre una plataforma de fuerzas en el centro de la 'habitación virtual'. Los datos registrados por el BNAVE son el movimiento de la cabeza, el centro de presión del pie y señales electromiográficas. La validez del sistema se ha probado en un estudio piloto con cinco participantes, dos de ellos con desórdenes vestibulares y tres sin patología. Ambos grupos respondieron a los estímulos visuales con incrementos sustanciales en el movimiento de la cabeza y el balanceo del cuerpo en sincronía con estos estímulos [54].

En el Instituto de Rehabilitación de la República de Eslovenia, un grupo de investigadores ha diseñado un sistema para el entrenamiento del equilibrio, con la peculiaridad de que dicho sistema ha sido concebido con la idea de que el paciente pueda utilizarlo en su casa, mientras que personal médico especializado puede supervisar las sesiones de forma remota [55]. Por este motivo, el entorno virtual se ha desarrollado como una aplicación web. Además de la aplicación, el sistema cuenta con una estructura hecha de acero y aluminio que permite al paciente inclinarse con dos grados de libertad y que está equipada con un sensor para medir la inclinación. Además, la estructura es capaz de soportar el peso del paciente para evitar posibles caídas. El sistema se ha probado hasta el momento con un único paciente durante un período de cuatro semanas. La evolución del paciente se monitorizó en función de los resultados obtenidos con la aplicación que permite conocer el número de aciertos y el tiempo empleado, así como con la escala de Berg [48], y de dos test cronometrados, como son el *Up and Go* [56] y el tiempo que tarda en recorrer una distancia de 10 metros [56]. Los resultados indi-

can un progreso muy similar al obtenido con sesiones de terapia en entornos clínicos.

Daño cerebral adquirido de causa traumática

También se han presentado aplicaciones de la RV en pacientes con daño cerebral adquirido de causa traumática. La mayoría de los trabajos para la rehabilitación de esta patología mediante RV tiene un enfoque cognitivo, aunque también existen algunas aplicaciones para las alteraciones motoras. El grupo del Instituto Tecnológico de Massachusetts ha utilizado el mismo sistema ya descrito anteriormente para el ictus, aunque con escenarios virtuales diferentes, para mejorar la capacidad funcional de pacientes con daño cerebral [57]. Cuatro pacientes con daño cerebral recibieron sesiones de terapia de una hora de duración en el entorno virtual. Se realizaron varios test clínicos para evaluar la capacidad motora y funcional de los pacientes, como el test de Fugl-Meyer [20], el *Emory Test* para extremidades superiores [58], una prueba funcional en el entorno virtual que consistía en verter líquido de una taza a otra, y la misma prueba en un entorno real equivalente. Los resultados obtenidos indicaban que los pacientes con daño cerebral eran capaces de aprender movimientos en entornos virtuales y generalizarlos para realizar tareas similares en el mundo real [57].

Un grupo de la Universidad de Lund (Suecia) ha desarrollado un sistema de neurorrehabilitación para pacientes con daño cerebral que consta de tres aplicaciones centradas en diferentes actividades de la vida diaria: preparar comida, utilizar máquinas expendedoras (concretamente un cajero automático) y encontrar caminos desde un punto a otro en un entorno complejo, como, por ejemplo, un edificio de un hospital [59]. El artículo se centra en el diseño del sistema, pero no comunica datos clínicos sobre los resultados obtenidos.

Conclusiones

No se han llevado a cabo ensayos clínicos que demuestren la eficacia de la aplicación de técnicas de RV en el tratamiento de las alteraciones motoras de procesos discapacitantes de origen neurológico debido a que se trata de procedimientos de muy reciente aplicación. Este tipo de tecnología es ya una realidad, con un funcionamiento suficientemente contrastado, que se aplica a numerosos padecimientos de origen neurológico y que abre unas posibilidades enormes en la parcela terapéutica, de motivación y de evaluación de este tipo de pacientes.

Bibliografía

1. Cano de la Cuerda R, Muñoz-Hellín E, Alguacil-Diego IM, Molina-Rueda F. Telerrehabilitación y neurología. *Rev Neurol* 2010; 51: 49-56.
2. Weiss PL, Kizony R, Feintuch U, Katz N. Virtual reality in neurorehabilitation. In Selzer M, Clarke S, Cohen L, Duncan P, Gage F, eds. *Textbook of neural repair and rehabilitation*. Cambridge: University Press; 2006. p. 182-97.
3. Holden MK. Virtual environments for motor rehabilitation: review. *Cyberpsychol Behav* 2005; 8: 187-211.
4. Rizzo A, Kim GJ. A SWOT analysis of the field of virtual reality rehabilitation and therapy. *Presence* 2005; 14: 119-46.
5. Viau A, Feldman AG, McFadyen BJ, Levin MF. Reaching in reality and virtual reality: a comparison of movement kinematics in healthy subjects and in adults with hemiparesis. *J Neuroeng Rehabil* 2004; 1: 11.
6. Subramanian S, Knaut LA, Beaudoin C, McFayden BJ, Feldman AG, Levin MF. Virtual reality environments for post-stroke arm rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil* 2007; 4: 20.
7. Knaut LA, Subramanian SK, McFadyen BJ, Bourbonnais D, Levin MF. Kinematics of pointing movements made in a virtual versus a physical 3-dimensional environment in healthy and stroke subjects. *Arch Phys Med Rehabil* 2009; 90: 793-802.
8. You SH, Jang SH, Kim Y, Hallett M, Ahn SH, Kwon Y, et al. Virtual reality-induced cortical reorganization and associated locomotor recovery in chronic stroke. An experimental-blind randomized study. *Stroke* 2005; 36: 1166-71.
9. Rose FD, Attree EA, Brooks BM. Virtual environments in neuropsychological assessment and rehabilitation. In Riva G, ed. *Virtual reality in neuro-psycho-physiology*. Amsterdam: IOS Press; 1997. p. 147-55.
10. Sveistrup H. Motor rehabilitation using virtual reality. *J Neuroeng Rehabil* 2004; 1: 10.
11. Fidopiastis CM, Stapleton CB, Whiteside JD, Hughes CE, Fiore SM, Martin GA, et al. Human experience modeler: context driven cognitive retraining to facilitate transfer of learning. *Cyberpsychol Behav* 2006; 9: 183-7.
12. Bouzit M, Burdea G, Popescu G, Boian R. The Rutgers Master II-new design force-feedback glove. *IEEE Trans Mechatron* 2002; 7: 256-63.
13. Merians AS, Poizner H, Boian R, Burdea G, Adamovich S. Sensorimotor training in a virtual reality environment: does it improve functional recovery poststroke? *Neurorehabil Neural Repair* 2006; 20: 1-16.
14. Merians AS, Jack D, Boian R, Tremaine M, Burdea GC, Adamovich SV, et al. Virtual reality-augmented rehabilitation for patients following stroke. *Phys Ther* 2002; 82: 898-915.
15. Adamovich SV, Merians AS, Boian R, Tremaine M, Burdea G, Recce M, et al. A virtual reality based exercise system for hand rehabilitation post-stroke. *International Workshop on Virtual Rehabilitation*. Piscataway, EEUU, septiembre de 2003.
16. Jebsen RH, Taylor N, Trieschmann RB, Trotter MJ, Howard LA. An objective and standardized test of hand function. *Arch Phys Med Rehabil* 1969; 50: 311-9.
17. Kuttuva M, Boian R, Merians A, Burdea G, Bouzit M, Lewis J, et al. The Rutgers Arm: an upper-extremity rehabilitation system in virtual reality. *Fourth International Workshop on Virtual Rehabilitation*. Santa Catalina, EE. UU., septiembre de 2005.
18. Polhemus Co. URL: <http://www.polhemus.com>. [04.09.2009].
19. Kuttuva M, Boian R, Merians A, Burdea G, Bouzit M, Lewis J, et al. The Rutgers Arm, a rehabilitation system in virtual reality: a pilot study. *Cyberpsychol Behav* 2006; 9: 148-52.
20. Fugl-Meyer AR, Jääskö L, Leyman I, Olsson S, Steglind S. The post-stroke hemiplegic patient. I. A method for evaluation of physical performance. *Scand J Rehabil Med* 1975; 7: 13-31.
21. Boian R, Lee CS, Deutsch JE, Burdea G, Lewis J. Virtual reality-based system for ankle rehabilitation post stroke. *1st International Workshop on Virtual Reality Rehabilitation*. Lausana, Suiza, 2002.
22. Boian R, Kourtev H, Erickson K, Deutsch JE, Lewis J, Burdea G. Dual Stewart-platform gait rehabilitation system for individuals post-stroke. *International Workshop on Virtual Rehabilitation*. Piscataway, EE. UU., septiembre de 2003.
23. Holden M, Todorov E, Callahan J, Bizzi E. Virtual environment training improves motor performance in two patients with stroke: case report. *Neurol Rep* 1999; 23: 57-67.
24. Holden M, Dyar T, Callahan T, Schwamm L, Bizzi E. Quantitative assessment of motor generalization in the real world following training in virtual environments in patients with stroke. *Neurol Rep* 2001; 25: 129-30.
25. Holden M, Dyar T. Virtual environment training: a new tool for neurorehabilitation. *Neurol Rep* 2002; 26: 62-71.
26. Wolf SL, Catlin PA, Ellis M, Archer AL, Morgan B, Piacentino A. Assessing Wolf Motor Function Test as outcome measure for research in patients after stroke. *Stroke* 2001; 32: 1635-9.
27. Hilton D, Cobb S, Pridmore T, Gladman J. Virtual reality and stroke rehabilitation: a tangible interface to an every day task. *Fourth International Conference on Disability, Virtual Reality & Assoc. Tech. Veszprém, Hungría, 2002*.
28. Pridmore T, Hilton D, Green J, Eastgate R, Cobb S. Mixed reality environments in stroke rehabilitation: interfaces across the real/virtual divide. *Fifth International Conference on Disability, Virtual Reality & Assoc. Tech. Oxford, Reino Unido, 2004*.
29. Luo X, Kenyon RV, Kline T, Waldinger HC, Kamper DG. An augmented reality training environment for post-stroke finger extension rehabilitation. *Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*. Chicago, EE. UU., 2005.
30. Luo X, Kline T, Fischer HC, Stubblefield KA, Kenyon RV, Kamper DG. Integration of augmented reality and assistive devices for post-stroke hand opening rehabilitation. *Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*. Shanghai, China, 2005.
31. Luo X, Kenyon RV, Kamper DG. VR Post-stroke hand opening rehabilitation: an approach utilizing virtual reality, body orthosis and pneumatic device. *International Conference on Aging Disability and Independence*. St Petersburg, EE. UU., 2006.
32. Jacobson-Sollerman C, Sperling L. Grip function of the healthy hand in a standardized hand function test. A study of the Rancho Los Amigos test. *Scand J Rehabil Med* 1977; 9: 123-9.
33. Desrosiers J, Bravo G, Hervert R, Dutil E, Mercier L. Validation of the Box & Block Test as a measure of dexterity of elderly people: reliability, validity and norms studied. *Arch Phys Med Rehabil* 1994; 75: 751-5.
34. SensAble technologies. URL: <http://www.sensable.com/products-haptic-devices.htm>. [15.09.2009].
35. Stewart JC, Yeh SC, Jung Y, Yoon H, Whitford M, Chen SY, et al. Intervention to enhance skilled arm and hand movements after stroke: a feasibility study using a new virtual reality system. *J Neuroeng Rehabil* 2007; 4: 21.
36. Eng K, Siekierka E, Pyk P, Chevrier E, Hauser Y, Cameirao M, et al. Interactive visuo-motor therapy system for stroke rehabilitation. *Med Biol Eng Comput* 2007; 45: 901-7.
37. Crosbie JH, McDonough, Lennon S, Pokluda L, McNeill DJ. Virtual reality in the upper limb after stroke. The user's perspective. *Proceedings of the Fifth International Conference on Disability, Virtual Reality & Assoc. Tech. Oxford, Reino Unido, 2004*.
38. Yavuzer G, Senel A, Atay MB, Stam HJ. 'Playstation eyetoy games' improve upper extremity-related motor functioning in subacute stroke: a randomized controlled clinical trial. *Eur J Phys Rehabil Med* 2008; 44: 237-44.
39. Deutsch JE, Robbins D, Morrison J, Bowlby PG. Wii-based compared to standard of care balance and mobility rehabilitation for two individuals post-stroke. *Virtual Rehabilitation 2009 International Conference*. Haifa, Israel, 2009.
40. GestureTek. URL: <http://www.gesturetek.com>. [05.10.2009].
41. Kizony R, Raz L, Katz N, Weingarden H, Weiss PL. Video-capture virtual reality system for patients with paraplegic spinal cord injury. *J Rehabil Res Dev* 2005; 42: 595-608.

42. Duncan PW, Weiner DK, Chandler J, Studenski S. Functional reach: a new clinical measure of balance. *J Gerontol* 1990; 45: 192-97.
43. Lynch SM, Leahy P, Barker SP. Reliability of measurements obtained with a modified functional reach test in subjects with spinal cord injury. *Phys Ther* 1998; 78: 128-33.
44. Riva G. Virtual reality in paraplegia: a VR-enhanced orthopaedic appliance for walking and rehabilitation. In Riva G, Wiederhold BK, Molinari E, eds. *Virtual environments in clinical psychology and neuroscience*. Amsterdam: IOS Press; 1998. p. 209-18.
45. Riva G. Virtual reality in paraplegia: a test bed application. *International Journal of Virtual Reality* 2001; 5: 1.
46. Kurtzke JF. Rating neurologic impairment in multiple sclerosis: an Expanded Disability Status Scale (EDSS). *Neurology* 1983; 33: 1444-52.
47. Leocani L, Comi E, Annovazzi P, Rovaris M, Rossi P, Cursi M, et al. Impaired short-term motor learning in multiple sclerosis: evidence from virtual reality. *Neurorehabil Neural Repair* 2007; 21: 273-8.
48. Berg K, Wood-Dauphinee S, Williams JJ, Gayton D. Measuring balance in the elderly: preliminary development of an instrument. *Physiother Can* 1989; 41: 304-11.
49. Powell LE, Myers AM. The Activities-specific Balance Confidence (ABC) Scale. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 1995; 50: 28-34.
50. Fulk GD. Locomotor training and virtual reality-based balance training for an individual with multiple sclerosis: a case report. *J Neurol Phys Ther* 2005; 29: 34-42.
51. Weghorst S, Prothero J, Furness T, Anson D, Riess T. Virtual images in the treatment of Parkinson's disease akinesia. *Medicine meets virtual reality II*. San Diego, EE. UU., enero de 1994.
52. Riess T. Augmented reality in the treatment of Parkinson's disease. In Morgan K, Satava M, Sieburg HB, Mattheus R, Christensen JP, eds. *Interactive technology and the new paradigm of healthcare*. Amsterdam: IOS Press; 1995. p. 298-302.
53. Baram Y, Aharon-Peretz J, Simionovici Y, Ron L. Walking on virtual tiles. *Neural Proc Lett* 2002; 16: 227-33.
54. Whitney SL, Sparto PJ, Brown KE, Furman JM, Jacobson JL, Redfern MS. The potential use of virtual reality in vestibular rehabilitation: preliminary findings with the BNAVE. *Neuro Rep* 2002; 26: 72-8.
55. Cikajlo I, Rudolf M, Goljar N, Matjacic Z. Virtual reality task for telerehabilitation dynamic balance training in stroke subjects. *Virtual Rehabilitation 2009 International Conference*. Haifa, Israel, 2009.
56. Rossier P, Wade DT. Validity and reliability comparison of 4 mobility measures in patients presenting neurologic impairment. *Arch Phys Med Rehabil*. 2001; 82: 9-13.
57. Holden M, Dettwiler A, Dyar T, Niemann G, Bizzi E. Retraining movement in patients with acquired brain injury using a virtual environment. In Westwood JD, Hoffman HM, Mogel GT, Stredney D, eds. *Medicine meets virtual reality*. Newport Beach: IOS Press; 2001. p. 192-8.
58. Wolf SL, LeCraw DE, Barton LA. Comparison of motor copy and targeted biofeedback training techniques for restitution of upper extremity function among patients with neurologic disorders. *Phys Ther* 1998; 69: 719-35.
59. Davies RC, Löfgren E, Wallergard M, Linden A, Boschian K, Minör U, et al. Three applications of virtual reality for brain injury rehabilitation of daily tasks. *Fourth International Conference on Disability, Virtual Reality & Assoc Tech*. Veszprém, Hungria, 2002.

Application of virtual reality in the motor aspects of neurorehabilitation

Introduction. Virtual reality allows the user to interact with elements within a simulated scene. In recent times we have been witness to the introduction of virtual reality-based devices as one of the most significant novelties in neurorehabilitation.

Aim. To review the clinical applications of the developments based on virtual reality for the neurorehabilitation treatment of the motor aspects of the most frequent disabling processes with a neurological origin.

Development. A review was carried out of the Medline, Physiotherapy Evidence Database, Ovid and Cochrane Library databases up until April 2009. This was completed with a web search using Google. No clinical trial conducted on its effectiveness has been found to date. The information that was collected is based on the description of the various prototypes produced by the different groups involved in their development. In most cases they are clinical trials conducted with a small number of patients, which have focused more on testing the validity of the device and checking whether it works correctly than on attempting to prove its clinical effectiveness. Although most of the clinical applications refer to patients with stroke, there were also several applications for patients with spinal cord injuries, multiple sclerosis, Parkinson's disease or balance disorders.

Conclusions. Virtual reality is a novel tool with a promising future in neurorehabilitation. Further studies are needed to demonstrate its clinical effectiveness as compared to the traditional techniques.

Key words. Balance. Parkinson. Rehabilitation. Spinal cord injury. Stroke. Virtual reality.