

Ventajas de la rehabilitación asistida mediante robot en la recuperación de las funciones motriz y visuoespacial en pacientes en fase de recuperación de un accidente cerebrovascular

Roger Newport

School of Psychology, University of Nottingham, University Park, Nottingham, United Kingdom.

RESUMEN

El accidente cerebrovascular (ACV) es una de las principales causas de discapacidad en Europa y consume una parte importante de los presupuestos sanitarios nacionales. Del 65% de los pacientes que sobreviven a un primer ACV y que continúan viviendo de manera independiente, el 35% presenta una discapacidad significativa y requiere ayuda para la realización de las actividades de la vida diaria. A pesar de que muchos pacientes que han presentado un ACV tienen un deterioro sensitivo o motor primario, una gran proporción de estos pacientes presenta alteraciones muy importantes de las funciones visuoespacial o sensorio-motriz. La mejora del resultado obtenido con los tratamientos disponibles actualmente para los pacientes que han tenido un ACV proporcionará ventajas importantes para los pacientes y contribuirá de manera sustancial a la reducción del coste económico de su rehabilitación. El uso de tratamientos asistidos por robot podría potenciar sustancialmente la recuperación funcional en los pacientes con ACV y, a su vez, reducir el grado de dedicación de los fisioterapeutas y los hospitales a estos pacientes. En este artículo se exponen las técnicas robóticas de rehabilitación disponibles en la actualidad.

Palabras clave

Accidente cerebrovascular. Rehabilitación. Extremidades superiores. Recuperación funcional. Trastornos perceptivos. Robótica.

The benefits of robot-assisted rehabilitation on the recovery of motor and visuospatial function in individuals recovering from stroke

ABSTRACT

Stroke is a leading cause of disability in Europe and accounts for a substantial proportion of national health budgets. Of the 65% of first stroke survivors living independently, 35% will be significantly disabled and will need help with activities of daily living. Although many stroke patients have primary sensory and/or motor deficits, a large proportion of victims have higher order impairments of visuospatial or sensorimotor function. Improving the success of therapies available for stroke patients will have major benefits for patients and will contribute substantial economic benefits. The use of robot-mediated therapy could substantially improve the recovery of function after stroke and in turn reduce the demands placed on therapists and hospitals. Current robot rehabilitation techniques and issues are discussed.

Key words

Stroke. Rehabilitation. Upper-limb. Recovery of function. Perceptual disorders. Robotics.

INTRODUCCIÓN

Los accidentes cerebrovasculares (ACV) son una causa importante de discapacidad en los países occidentales. A pesar de que la mayor parte de los pacientes sobrevive a un ACV de origen isquémico, muchos de ellos presentan, como consecuencia, alguna forma de discapacidad; hasta la tercera parte de estos pacientes presenta dependencia funcional un año después de haber sufrido el ACV, lo que obliga a su asistencia médica a largo plazo o a su institucionalización¹. Según cuales sean las regiones cerebrales en las que ha tenido lugar la muerte neuronal, se puede producir una pérdida o alteración de las funciones de control, sensoriales o cognitivas. La incidencia del ACV varía espectacularmente en las distintas ciudades y los distintos países. Por ejemplo, mientras que en Inglaterra y Escocia se han estimado unas incidencias de 200 y

La investigación sobre rehabilitación robótica que se ha realizado en la Nottingham University ha sido patrocinada por la BUPA Foundation y por el Nottingham University Research Innovation Services New Researcher's Fund.

Correspondencia: R. Newport.
School of Psychology, University of Nottingham, University Park,
Nottingham, NG7 2RD, UK.
Correo electrónico: roger.newport@nottingham.ac.uk

280/100.000 personas, respectivamente², la incidencia media en Europa es de sólo 125/100.000 y en EE.UU. de 180/100.000 habitantes^{3,4}.

Los costes económicos que conlleva el ACV para los servicios sanitarios son considerables y se ha estimado que aumentarán en un 30% en los próximos 20 años⁵. En EE.UU., el ACV tiene un coste anual superior a 56.800 millones de dólares y el 62% de esta cifra se debe a los costes de la asistencia hospitalaria y domiciliaria a los pacientes⁶; por su parte, en Europa la cobertura sanitaria del ACV representa el 5-10% del presupuesto sanitario⁷. Del 65% de las personas que sobreviven a un primer ACV y que viven de manera independiente, el 35% presenta una discapacidad significativa⁸ y requiere una ayuda considerable para realizar las actividades de la vida diaria, o bien las visitas de un profesional de enfermería domiciliaria. Muchos de estos pacientes no pueden vivir independientemente y deben ingresarse en algún tipo de residencia. Hasta el 20% de las personas que presentan su primer ACV cada año en el Reino Unido todavía no ha alcanzado su edad de jubilación⁹ y, a pesar de la elevada prevalencia del ACV y de la importante carga económica que representa este problema para el sistema sanitario, el presupuesto dedicado a la investigación del ACV es sustancialmente inferior si se compara, desde el punto de vista epidemiológico, con el correspondiente a otras enfermedades, como las cardíacas y el cáncer¹⁰. Por todo ello, cualquier mejora que se introduzca en el tratamiento de los pacientes que presentan un ACV aportará ventajas importantes para los pacientes y contribuirá de manera sustancial a reducir los presupuestos económicos dedicados a esta enfermedad.

En lo que se refiere al 35% de los pacientes con secuelas de discapacidad grave a causa de un ACV, las características de sus déficits dependerán de la localización precisa de la lesión cerebral. Una de las consecuencias más frecuentes del ACV es la alteración en el movimiento y la coordinación de los miembros superiores. De hecho, más de las tres cuartas partes de los pacientes que presentan un ACV tiene una deficiencia inicial en el miembro superior¹¹. Aproximadamente, sólo la mitad de estos pacientes recuperará finalmente esta función^{11,12}. Estas cifras indican que, como promedio, 4-5/1.000 pacientes europeos presentarán anualmente alguna forma de déficit funcional del miembro superior tras un ACV. Se ha demostrado que la recuperación de los miembros superiores es más difícil que la de los miembros inferiores^{11,13}, lo que se ha atribuido a la complejidad de las funciones que desarrollan éstos. Mientras que las funciones primarias que lleva a cabo el miembro inferior durante la realización de las actividades cotidianas son el equilibrio, la postura y la deambulacion, entre las funciones del miembro superior están los movimientos de alcance y sujeción finos y dirigidos hacia objetivos, así como los gestos significativos y complejos, junto con la postura y el equilibrio. En concreto, los movimientos de alcance y sujeción representan una función extraordina-

riamente compleja y altamente desarrollada que está dirigida hacia la consecución de los objetivos y de la que se desconocen en gran medida los mecanismos subyacentes a pesar del papel clave que desempeña en las actividades cotidianas¹⁴. Así, hay muy poca información acerca de los mecanismos fundamentales correspondientes a la recuperación neuronal tras un ACV, a pesar de la gran importancia del ACV como problema sanitario. Los mecanismos implicados en la plasticidad cortical cerebral podrían incluir la puesta en funcionamiento de conexiones sinápticas preexistentes, las modificaciones sinápticas determinadas por la actividad neuronal, el desarrollo de nuevas conexiones o la asunción de la función perdida por áreas corticales adyacentes que no están lesionadas.

Las técnicas tradicionales de fisioterapia implican a menudo la realización de ejercicios manuales intensivos por parte de un fisioterapeuta especialmente preparado. Estas técnicas están fuertemente fundamentadas en la habilidad individual del fisioterapeuta y son muy exigentes en cuanto al tiempo de dedicación de estos profesionales. Durante los últimos años se han abierto líneas de investigación respecto a un tipo distinto de rehabilitación, la rehabilitación mediada por dispositivos mecánicos más que fundamentada en la intervención humana. El objetivo de este artículo es exponer las ventajas y los inconvenientes de estos sistemas, en comparación con las demás técnicas de rehabilitación.

FISIOTERAPIA TRADICIONAL

A pesar de los obvios buenos resultados de la fisioterapia tradicional, éstos resultan también inconsistentes. La práctica de la fisioterapia está fundamentada parcialmente en aspectos teóricos, pero también lo está fuertemente en la formación y la experiencia del fisioterapeuta, lo que hace que los resultados sean variables en cada hospital y en los pacientes atendidos por cada fisioterapeuta. De los numerosos abordajes propuestos para las técnicas de fisioterapia, quizá los más populares sean el concepto de Bobath¹⁵ y el método de Carr y Shepherd¹⁶. En 2001, el concepto de Bobath constituía el método preferido de rehabilitación entre los fisioterapeutas británicos experimentados, de manera que aproximadamente las dos terceras partes de ellos utilizaba este método¹⁷; no obstante, el método preciso aplicado presenta grandes variaciones dependiendo del momento, el lugar y los profesionales encargados de la formación del fisioterapeuta. Uno de los aspectos clave del tratamiento es el hecho de que los pacientes necesitan presentar un tono muscular normal y utilizar patrones normales de movimiento para realizar las tareas funcionales. No se recomiendan los ejercicios con movimientos funcionales activos si el fisioterapeuta considera que existe el peligro de que esos movimientos puedan reforzar un tono anómalo en el miembro afectado. El método de Carr y Shepherd¹⁶ está fundamentado en el «reaprendizaje» de habilidades motri-

ces, que requieren un entrenamiento más activo del miembro afectado. A pesar de los intentos que se han realizado para comparar ambos métodos, actualmente no hay pruebas suficientes que demuestren que uno de ellos sea más efectivo que el otro^{18,19}, y Coote y Stokes²⁰ han señalado que todavía no se ha alcanzado la fisioterapia idónea para el miembro superior tras presentar un ACV. Sin embargo, varios estudios han señalado que el reaprendizaje motor y los grados de recuperación de las extremidades superiores tienden a mejorar con la aplicación de programas de fisioterapia intensiva²¹⁻²³.

Las alteraciones de la función sensorio-motriz que impliquen afectación de la planificación y el control de los movimientos son una secuela extremadamente frecuente del ACV. Por ejemplo, la apraxia ideomotriz afecta aproximadamente al 50% de los pacientes hospitalizados a consecuencia de un ACV con lesión en el hemisferio izquierdo⁹. Tienen una significación clínica especial las alteraciones en el control de la deglución, la postura y los movimientos del miembro superior, que causan problemas considerables en la recuperación de una vida independiente. A pesar de que los métodos de Bobath¹⁵ y de Carr y Shepherd¹⁶ son los que se utilizan con una frecuencia mayor, en la práctica clínica hay numerosas variaciones en el tratamiento de rehabilitación. Muchas de las técnicas utilizadas en la actualidad para la rehabilitación de los trastornos sensorio-motrices están fundamentadas en el hecho de que los pacientes practiquen de manera intensiva tareas motrices simples, por ejemplo, el contacto repetido de un dedo del miembro afectado con un objetivo visual. La utilización de los principios prácticos que facilitan el mantenimiento de las habilidades motrices que ejecutan diversas tareas de habilidad puede promover cambios positivos en las capacidades motrices tras un ACV²⁴. A menudo, este abordaje terapéutico se combina con la evitación activa del movimiento del miembro no alterado del paciente, en lo que se ha denominado «terapia de restricción inducida». Una de las terapias basadas en la conducta de mayor eficacia es la denominada modelado. Es posible mejorar considerablemente los movimientos del miembro superior mediante la realización de sesiones diarias de 90 min de ejercicios de modelado, es decir, con una dedicación de tiempo considerablemente inferior a la que ha demostrado ser eficaz la terapia de restricción inducida (6 h/día)²⁵. En la terapia de modelado, los pacientes son atendidos de manera individual y realizan tareas de dificultad creciente con el miembro afectado, recibiendo posteriormente recompensas por sus avances. Las tareas que llevan a cabo son las correspondientes a las actividades cotidianas, tal como presionar el interruptor de la luz, desplazar una silla o ponerse los calcetines. Como recompensa por la realización de una tarea, los pacientes reciben el estímulo y el reconocimiento del personal que les atiende.

La terapia de modelado basada en el comportamiento tiene claramente muchas ventajas, pero también presenta algunos inconvenientes. En primer lugar, la práctica de la

fisioterapia está guiada con frecuencia por la experiencia más que por los aspectos teóricos y, en consecuencia, se pueden plantear incongruencias considerables entre los distintos fisioterapeutas y entre los distintos hospitales. Los tratamientos de rehabilitación fundamentados en dispositivos mecánicos permiten efectuar mediciones objetivas útiles y fiables del rendimiento de los pacientes, mediciones que pueden ser analizadas fácilmente por los clínicos y los fisioterapeutas. En segundo lugar, los tratamientos fundamentados en aspectos comportamentales conllevan, a menudo, la realización de tareas intensamente repetitivas que, para ser eficaces, se deben efectuar durante largos períodos. Por ejemplo, la terapia de restricción inducida puede requerir 6 h/día. Estas técnicas tienen un carácter extremadamente intensivo respecto al tiempo dedicado por el fisioterapeuta y pueden inducir una fatiga importante en éste (lo que puede producir inconsistencias prácticas). La evidencia actual indica que las terapias de realización repetitiva de tareas específicas asistidas por robots pueden ser más eficaces para la reducción a largo plazo de las alteraciones motrices en el brazo afectado por un ACV, tanto en términos de fuerza y estado motor como en lo relativo a la reducción de la espasticidad y el tono musculares²⁶⁻³⁰. Por otra parte, los tratamientos asistidos por dispositivos mecánicos pueden ofrecer mediciones objetivas del rendimiento de los pacientes que son útiles y fácilmente analizables por los clínicos y los fisioterapeutas.

TERAPIA ASISTIDA POR ROBOT

Varios autores han propuesto el uso de dispositivos robóticos para la rehabilitación del miembro superior tras un ACV. El trabajo pionero de investigadores como Krebs, Volpe y Hogan, del Massachusetts Institute of Technology y del Burke Medical Research Institute, ha demostrado que el robot MIT-MANUS reduce de manera eficaz el tiempo de recuperación motriz del paciente al realizar los ejercicios sistemáticos apropiados para la rehabilitación del hombro y el codo³¹. La rehabilitación asistida por robot ofrece ventajas importantes respecto a la fuerza muscular, el aumento de las puntuaciones clínicas y un grado mayor de recuperación de la independencia funcional³⁰, y se ha demostrado que estos efectos se mantienen durante un período de al menos 3 años³⁰. Sin embargo, el efecto terapéutico no es fácilmente transferible a otros miembros o segmentos musculares, a pesar de lo cual los resultados obtenidos con el robot MIT-MANUS fueron tan prometedores que se ha empezado a desarrollar toda una gama de robots (denominado Anklebot) para la recuperación de la función del miembro inferior.

Además del robot MIT-MANUS, se están desarrollando, o ya se han desarrollado, otros dispositivos robóticos como GENTLE/s, ARM-guide y MIME. La investigación sobre rehabilitación robótica que se lleva a cabo en la Universidad de Nottingham está fundamentada en el dispositivo de manipulación experimental vBot, diseñado

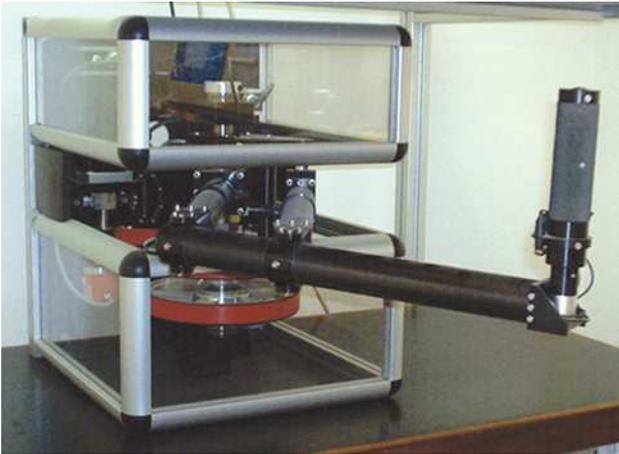


Figura 1. Dispositivo de manipulación robótica vBot 2 DOF utilizado para la investigación sobre rehabilitación en la University of Nottingham. Los pacientes sujetan el extremo del dispositivo de manipulación, que se mueve libremente cuando no se aplican fuerzas (véanse detalles en el texto).

por el laboratorio de Daniel Wolpert³³. vBot es un dispositivo construido a medida y formado por un paralelogramo de fibra de carbono dirigido por motores alimentados por elementos magnéticos de neodimio a través de cinturonas de temporización con fricción baja (fig. 1), y muchas de sus características son similares a las de los dispositivos robóticos de manipulación. Los *encoders* incrementales de alta resolución conectados a los motores propulsores permiten el cálculo adecuado de la posición del robot a 1.000 Hz. El dispositivo vBot puede ejercer fuerzas terminales importantes y mantener al mismo tiempo un grado importante de rigidez y grados bajos de fricción e inercia. Un dispositivo de dos grados de libertad permite los movimientos alrededor de las articulaciones del codo y el hombro en el plano horizontal. El paciente sujeta con la mano un mango existente en el extremo del dispositivo de manipulación, de manera que el peso del brazo queda soportado por un cabestrillo con objeto de reducir los efectos de la gravedad y de prevenir la posibilidad de que se produzca un esguince del hombro en el brazo afectado. Los potentes motores dirigen las articulaciones del hombro y el codo del brazo robótico al tiempo que varios sensores de fuerza y posición determinan el trayecto espacial de la mano y la cantidad de fuerza que realiza el paciente.

Cuando el robot no está aplicando fuerza, el dispositivo puede ser movido fácilmente por el paciente. Cuando el robot aplica fuerza, ésta puede ser un movimiento de asistencia, de guía o de ayuda, y el robot también puede realizar fuerzas de resistencia frente a las cuales el paciente debe realizar movimientos de empuje para conseguir su objetivo. Los pacientes realizan ejercicios similares a videojuegos desplazando un cursor que aparece en la pantalla hacia objetivos que se muestran en la misma pantalla. El rendimiento suele estar fijado, de manera que,

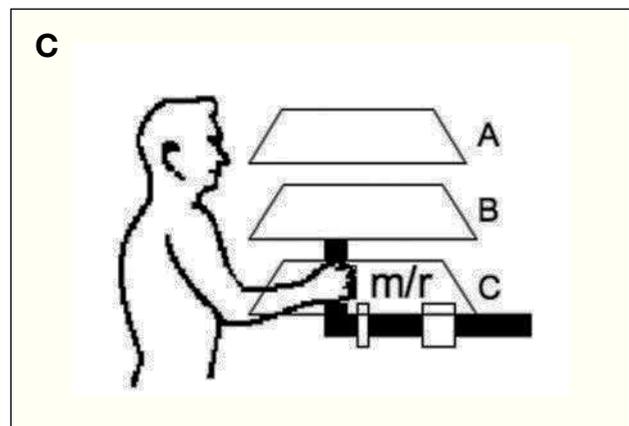
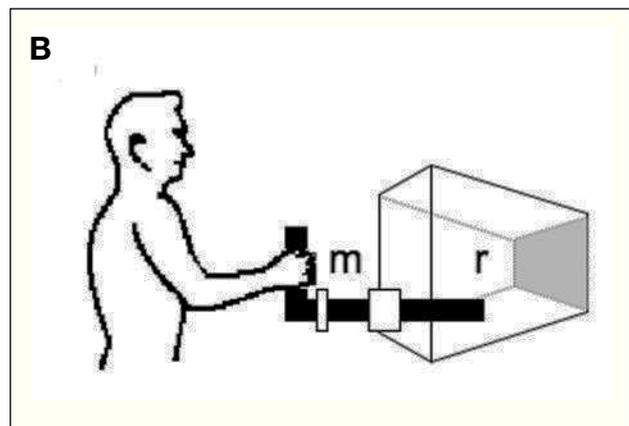
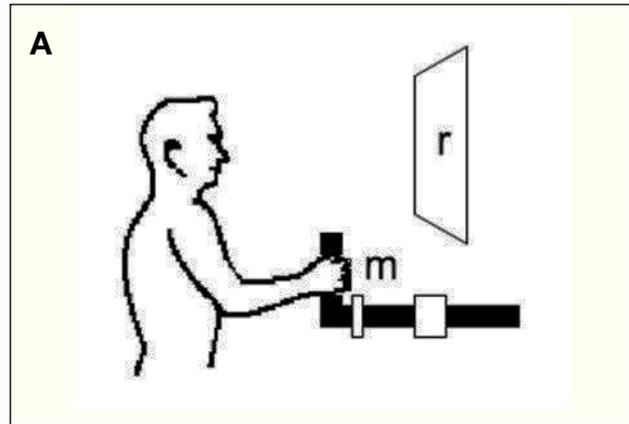


Figura 2. Diversas configuraciones visuoespaciales utilizadas con diferentes robots de rehabilitación. A: MIT-MANUS, los movimientos en el plano *m* están representados en la pantalla del ordenador en el plano *r*. B: GENTLE/s, los movimientos en el plano *m* están representados en modo tridimensional en la pantalla del ordenador en la localización *r*. C: vBot Nottingham, los movimientos en el plano *m* están representados en la pantalla A y reflejados en espejo en B, debido a lo cual parece como si se localizaran en el plano C. Por tanto, el movimiento *m* y la representación *r* coinciden en el espacio y no es necesaria ninguna transformación sensitivo-motriz compleja adicional por parte del paciente. La coincidencia de la visión y el tacto potencia la calibración visual y propioceptiva, y en diversos estudios se ha demostrado que la información de retroalimentación real incrementa cualitativamente en mayor medida los efectos del aprendizaje motor, en comparación con la información de retroalimentación de representación³⁶.

con independencia del grado de asistencia prestada por el robot, el paciente percibe en todo momento que la exactitud de su movimiento se sitúa entre el 70 y el 90% en la mayoría de los ensayos que realiza. Así, el aprendizaje es percibido como relativamente «libre de error», y los esfuerzos del paciente son reforzados para inducir una motivación en éste que le haga mejorar todavía más. En los movimientos asistidos, la mano del paciente se suele desplazar según la teoría de la sacudida mínima de la dinámica del movimiento, lo que permite una trayectoria natural de la mano entre el inicio y el final del trayecto especificados³⁴. A medida que mejora el control muscular por parte del paciente, es posible reducir el grado de asistencia robótica. El tipo de ayuda robótica necesario se puede decidir individualmente en función de las capacidades residuales de cada paciente.

Uno de los inconvenientes principales de estos sistemas en los pacientes con ACV es que el movimiento de la extremidad y el *feedback* visual de ese movimiento no coinciden espacialmente. En el dispositivo MIT-MANUS, el campo visual se mantiene generalmente con un ángulo de 90° respecto al miembro en movimiento³¹, mientras que con el dispositivo GENTLE/s el *feedback* visual relativo al movimiento se mantiene en el mismo plano, pero en el exterior del espacio peripersonal del paciente³⁵. El efecto es bastante similar al de mover un cursor de ratón, contemplando los efectos de su desplazamiento en un monitor, lo que implica tener que aprender una transformación sensorio-motriz compleja³⁶. A pesar de que este tipo de transformaciones es relativamente sencillo en las personas sin alteraciones neurológicas, su aprendizaje es extremadamente difícil en los pacientes con lesión cerebral, especialmente en los que se recuperan de un ACV que ha afectado al córtex parietal. La coincidencia de la visión y el tacto ofrece ventajas considerables para la precisión del movimiento y para la función propioceptiva del miembro afectado en los pacientes que se recuperan de un ACV³⁷. El sistema utilizado actualmente en la Universidad de Nottingham utiliza un proyector de realidad virtual y un espejo que permite la representación del *feedback* del miembro en movimiento, de manera que pueda ser visto por el paciente en el mismo plano que su miembro (fig. 2). Una de las ventajas principales de este dispositivo es que se puede ampliar la aplicación del tratamiento asistido por robot desde los déficit puros de movimiento a los trastornos visuoespaciales, que también presentan habitualmente estos pacientes.

ALTERACIONES DE LA FUNCIÓN VISUOESPACIAL

Los trastornos que afectan a la representación del espacio personal y extrapersonal (p. ej., la heminegligencia espacial, la hemianestesia o pérdida somatosensorial, y la ataxia óptica) son consecuencias frecuentes del ACV y se observan en aproximadamente el 70% de los pacientes en la fase aguda³⁸. Los pacientes con síndromes de heminegligencia espacial no suelen ser conscientes de los

objetos o acontecimientos que se localizan o tienen lugar en el espacio correspondiente al lado opuesto de su lesión, de manera que pueden darse golpes con las personas que están cerca de ellos en ese lado, pueden tener dificultades importantes para vestirse a sí mismos en ese lado, o pueden tomar únicamente el alimento colocado en el lado del plato más cercano a su lesión. En las pruebas clínicas de heminegligencia, como las tareas de cancelación, los pacientes son incapaces de marcar los estímulos que aparecen en una página y que se localizan en el lado contrario al de su lesión. Estas dificultades no se deben a alteraciones sensoriales o motrices primarias, sino que son la consecuencia de la alteración de mecanismos de orden superior. Un aspecto importante es que la heminegligencia dificulta la rehabilitación tras el ACV y reduce significativamente la capacidad del paciente para recuperar su independencia funcional³⁹. Los síntomas de inatención pueden mejorar tras un breve período de estimulación sensorio-motriz. Las técnicas utilizadas hasta el momento han sido la estimulación vestibular⁴⁰⁻⁴², la vibración de los músculos del cuello^{43,44} y la estimulación optocinética⁴⁵⁻⁴⁸. Sin embargo, los efectos de estos métodos han tenido de manera invariable una duración corta. Por el contrario, se han obtenido efectos sostenidos tras la aplicación de períodos muy breves de adaptación a prismas ópticos con desplazamiento lateral⁴⁹. Se ha demostrado que está técnica da lugar a una reducción significativa de los síntomas de inatención que puede durar varias horas, tras una sesión de adaptación con prismas de tan sólo 20 min de duración⁵⁰.

La aplicación de una perturbación sencilla y uniforme, como la que representan los prismas ópticos, conlleva una flexibilidad escasa para diseñar la perturbación que se debe aplicar al paciente frente a su patrón específico e individual de problemas visuoespaciales. Los prismas ópticos producen una perturbación que es idéntica en todas las regiones del espacio visual y que da lugar al mismo efecto en cada sesión. Por el contrario, los trastornos de la representación espacial que se observan en los pacientes en fase de recuperación de un ACV tienen una naturaleza invariablemente no uniforme y en su mayor parte presentan un gradiente de gravedad en el espacio peripersonal. Un problema que todavía no se ha evaluado es la posibilidad de que la rehabilitación de los síndromes de heminegligencia visuoespacial se pueda potenciar mediante la aplicación de una perturbación visuoespacial diseñada con precisión respecto al patrón individual de alteración visuoespacial del paciente, con un ajuste regular de ésta durante todo el proceso de rehabilitación en función de las modificaciones detectadas en el rendimiento visuoespacial. Una limitación adicional de la aplicación de una perturbación visuomotriz única y uniforme es el hecho de que no ofrece variabilidad en el resultado durante el aprendizaje. En los estudios sobre aprendizaje con refuerzo efectuados tanto en animales como en humanos se ha demostrado que los programas de refuerzo intermitentes facilitan un aprendizaje más sólido que el que se consigue con los programas de refuer-

zo fijos⁵¹. El aprendizaje motor también se puede aprovechar de la presencia de variabilidad durante el aprendizaje. En concreto, es probable que la generalización del aprendizaje se pueda potenciar si el programa de entrenamiento contiene situaciones variables⁵². La ventaja de la manipulación robótica con *feedback* visual que coincide espacialmente consiste en que se puede utilizar para conseguir la respuesta a todas estas cuestiones. Por ejemplo, este dispositivo se podría utilizar para aplicar perturbaciones tanto visuoespaciales como mecánicas en el miembro, incluidos grados diversos de variabilidad en cada ensayo.

TERAPIA ROBÓTICA BIMANUAL

Tanto los tratamientos más tradicionales como los más recientes asistidos por robot se han centrado en la rehabilitación y el fortalecimiento muscular del miembro afectado por paresia. Sin embargo, muchas tareas de la vida cotidiana requieren una coordinación precisa de ambos miembros, desde la apertura de un paquete de comida hasta la realización de nudos en los cordones de los zapatos. Los limitados estudios que han investigado la rehabilitación bimanual asistida por dispositivos mecánicos (menos de 10 en una década) han tenido 2 inconvenientes importantes: en primer lugar, se han realizado sobre movimientos con un solo grado de libertad (p. ej., los movimientos del antebrazo alrededor de la articulación del codo), más que sobre movimientos de todo el miembro; en segundo lugar, se han evaluado movimientos oscilatorios repetitivos más que movimientos naturales dirigidos hacia objetivos⁵³. Además, en la mayoría de los tratamientos robóticos unimanuales se ha aplicado la teoría de la sacudida mínima para conseguir una aproximación al trayecto ideal de la mano para cualquier movimiento asistido. Sin embargo, las limitaciones de la tarea y la variabilidad de los movimientos naturales implican que muchos movimientos unimanuales normales no son congruentes con la teoría de la sacudida mínima. Como mucho, esta teoría representa una aproximación artificial al movimiento ideal del individuo medio. Realmente, el trayecto más apropiado de la mano será probablemente el seleccionado por el cerebro del propio paciente.

Un desarrollo crucial en las terapias robóticas fue basar la asistencia prestada por el robot en los movimientos naturales del propio paciente, más que en función de los movimientos generados por modelos teóricos⁵⁴. Cuando realizamos movimientos bimanuales, los programas motores de ambos miembros se «acoplan» entre sí^{55,56}. Cuando el paciente realiza movimientos bimanuales, el movimiento del miembro con paresia (asistido por el robot) puede reflejar en espejo la velocidad y la trayectoria del miembro normal. La hipótesis planteada es que el emparejamiento de un programa motor preciso (aplicado al miembro normal) con una ejecución motriz realista y precisa (del miembro con paresia) puede facilitar la selección de los grupos musculares más apropiados para la realización de la tarea requerida, así como constituir un trampo-

lín para la reorganización cortical y la recuperación espontánea.

¿REDUCCIÓN O POTENCIACIÓN DEL ERROR?

Hasta hace poco tiempo, los métodos principales de rehabilitación robótica eran de asistencia (ayuda para desplazar la mano hacia el objetivo²⁹) o de resistencia (aplicación de fuerzas contrarias al movimiento⁵⁷). Los prometedores resultados de rehabilitación obtenidos con las gafas de prismas ya comentadas han planteado aspectos interesantes en la investigación sobre la rehabilitación asistida por robot. La mejora de la sintomatología visuoespacial mediante el uso de prismas está fundamentada en las consecuencias de la adaptación a los propios prismas. Los pacientes con síndromes de heminegligencia no responden apropiadamente a los estímulos existentes en su lado izquierdo. Intuitivamente, podríamos considerar la aplicación de prismas en desplazamiento en el lado derecho del paciente, de manera que todo lo que apareciera en su campo visual estuviera incluso más alejado hacia la derecha, lo que empeoraría el problema. Sin embargo, tras un período de adaptación, señalando los objetivos con prismas que se desplazan hacia la derecha, tanto las personas sin alteración neurológica como los pacientes muestran una consecuencia negativa tras la eliminación de los prismas. Este efecto posterior negativo hace que los individuos intenten alcanzar erróneamente objetivos visuales hacia la izquierda (inicialmente, los prismas hacen que los individuos intenten alcanzar erróneamente los objetivos hacia la derecha, pero la adaptación al desplazamiento es rápida y el movimiento de alcance se hace preciso de manera muy rápida), pero mientras que en las personas sin alteración neurológica esta secuela negativa desaparece con mucha rapidez, los pacientes con síndromes de heminegligencia mantienen a largo plazo las mejoras en las pruebas estandarizadas de negligencia visuomotriz.

Utilizando principios de adaptación motriz similares a los que tienen lugar cuando se usan gafas de prismas, Patton et al⁵⁸ han evaluado recientemente la posibilidad de utilizar la adaptación a una perturbación mecánica con objeto de mejorar el rendimiento motor tras un ACV. A pesar de que la adaptación a las fuerzas proporcionadas por dispositivos mecánicos tiende a ser más lenta que la correspondiente a las perturbaciones visuales simples, el ser humano es capaz de adaptarse a diversos campos de fuerza simples y complejos. Las perturbaciones se pueden realizar en los campos de fuerza dependientes de la posición, la velocidad o la aceleración⁵⁹⁻⁶³ y también sobre las fuerzas que tienen lugar en una dirección perpendicular a la velocidad de la mano⁶². En estudios recientes se ha señalado que el ser humano se puede adaptar a estos campos de fuerza a través del aprendizaje del modelo interno apropiado de la perturbación, más que del aprendizaje de una secuencia temporal apropiada de las activaciones musculares^{62,63}. Por tanto, un método de reha-

bilitación posible sería la evaluación de las capacidades motrices de cada paciente con diseño de un campo de fuerza terapéutico apropiado, de manera que la adaptación a éste daría lugar a secuelas de adaptación útiles para el paciente. En otras palabras, si la alteración del paciente consiste en que se equivoca y se dirige hacia la derecha, entonces la adaptación del paciente a un campo de fuerza que haga que no se equivoque y no se desplace hacia la derecha daría lugar a la consecuencia de que esa adaptación le permitiría una mayor capacidad de alcance hacia la izquierda, en comparación con la situación anterior.

En el experimento de Patton et al⁵⁸ participaron 27 pacientes que permanecían en la fase crónica de un ACV unilateral y que no presentaban alteraciones sensoriales o cognitivas graves; los pacientes realizaron movimientos dirigidos hacia objetivos visuales al tiempo que sostenían el extremo del dispositivo de manipulación. Durante la fase de aprendizaje de los movimientos del experimento, los pacientes fueron expuestos a un campo de fuerza «ondulante» en el que las fuerzas siempre tenían una dirección ortogonal respecto a la velocidad de la mano. La mitad de los pacientes fue expuesta a fuerzas en la dirección de las agujas del reloj y la otra mitad a fuerzas en la dirección contraria a la de las agujas del reloj. Al igual que las personas del grupo control, los pacientes mostraron secuelas significativas tras la retirada del campo de fuerza. Un aspecto clave fue que en los pacientes en los que el campo de fuerza redujo la magnitud de sus errores iniciales no se observaron efectos beneficiosos por la adaptación, pero en los pacientes que fueron expuestos a un campo de fuerza con magnificación de los errores se demostró una reducción de los errores postadaptación. Se podría concluir que cuando los movimientos correspondientes a las secuelas permiten realizar tareas más similares a las tareas precisas y eficientes, el modelo interno aprendido es adoptado por el sistema motor respecto a todos los movimientos normales (tareas sin perturbación), mientras que cuando el modelo aprendido da lugar a movimientos menos eficientes, es abandonado.

EL FUTURO DEL TRATAMIENTO ROBÓTICO

A pesar de las pruebas que demuestran la idoneidad de las ventajas terapéuticas conseguidas con los dispositivos robóticos, y de que existe una gran confianza respecto al futuro de esta área, la investigación robótica todavía está dando sus primeros pasos y tenemos muy poca información acerca de las ventajas a largo plazo respecto a los pacientes y los mecanismos subyacentes que pueden potenciar la recuperación. A pesar de los prometedores resultados, todavía no se ha llevado a cabo la investigación del método óptimo de entrenamiento robótico, y la terapia robótica sigue presentando distintos inconvenientes, tal como su coste económico y la falta de portabilidad (actualmente, el precio del dispositivo vBot es de alrededor de 35.000 euros y su peso es de aproximadamente 30

kg), además de que sigue existiendo una cierta resistencia por parte de muchos fisioterapeutas. Sin embargo, el objetivo de la investigación en rehabilitación asistida por robot no es sustituir el contacto terapéutico personal que tiene lugar con el fisioterapeuta. Además de por la experiencia invaluable que puede proporcionar el fisioterapeuta en lo relativo a la manipulación adecuada, la motivación y los consejos que puede ofrecer a los pacientes, muchos pacientes, aunque acepten la eficacia de la terapia con robots, siguen prefiriendo el tratamiento manual. La idea que sustenta al tratamiento robótico es que puede representar un tratamiento complementario, controlado e individualizado cuyos efectos beneficiosos se pueden controlar y medir de manera precisa. En lo que se refiere al paciente, la ventaja principal puede ser la disminución del tiempo que debe pasar en el hospital y del tiempo durante el que debe recibir asistencia en su hogar para conseguir un nivel aceptable de realización de sus actividades cotidianas. La mejora sustancial de la recuperación funcional de los pacientes con ACV mediante el tratamiento robótico también dará lugar a una reducción sustancial de la carga de trabajo de los fisioterapeutas, lo que les permitirá atender a un número mayor de pacientes, además de facilitar a los hospitales un ahorro importante en camas, tiempo y dinero.

BIBLIOGRAFÍA

1. Murray CJL, Lopez AD. The Global Burden of Disease: a comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries, and risk factors in 1990 and projected to 2020. Boston: Harvard University Press; 1996.
2. Isard PA, Forbes JF. The cost of stroke to the National-Health-Service in Scotland. *Cerebrovasc Dis.* 1992;2:47-50.
3. Stewart JA, Dundas R, Howard RS, Rudd AG, Wolfe CDA. Ethnic differences in incidence of stroke: Prospective study with stroke register. *BMJ.* 1999;318:967-71.
4. Scottish Health Statistics 2002. Information and Statistics Division Scotland, Edinburgh, 2002.
5. Westcott P. Stroke — Questions and Answers. London: The Stroke Association, Stroke House; 2000.
6. Heart Disease and Stroke Statistics 2005. American Stroke Association. American Heart Association, 2005.
7. Hacke W, Kaste M, Skyhoj Olsen T, Orgogozo JM, Bogousslavsky J. European Stroke Initiative (EUSI) recommendations for stroke management. The European Stroke Initiative Writing Committee. *Eur J Neurol.* 2000;7:607-23.
8. Abrams W, Berkow R, editors. *Merk Manual of Geriatrics.* Whithouse Station: Merk Research Laboratories; 1997.
9. Carrol K, Majeed A. Stroke incidence and risk factors in a population-based prospective cohort study. *Health statistics quarterly.* Office for National Statistics, Winter 2001.
10. Geddes JM, Fear J, Tennant A, Pickering A, Hillman M, Chamberlain MA. Prevalence of self reported stroke in a population in northern England. *J Epidemiol Community Health.* 1996;50:140-3.
11. Parker VM, Wade DT, Langton-Hewer R. Loss of arm function after stroke: Measurement, frequency, and recovery. *Int Rehabil Med.* 1986;8:69-73.
12. Broeks JG, Lankhorst GJ, Rumping K, Prevo AJ. The long-term outcome of arm function after stroke: Results of a follow up study. *Disabil & Rehabil.* 1999;21:357-64.
13. Feys HM, De Weert WJ, Selz, BE, Cox Steck GA, Spichiger R, Vereeck L, et al. Effect of a therapeutic intervention for the hemiplegic upper limb in the acute phase after stroke: A single-blind, randomised, controlled multicentre trial. *Stroke.* 1998;29:785-92.

14. Ashburn A. Physiotherapy in the rehabilitation of stroke: A review. *Clin Rehabil.* 1993;7:337-45.
15. Bobath B. *Adult Hemiplegia: Evaluation and Treatment.* London: Heinemann; 1978.
16. Carr JH, Shepherd RB. *A Motor Relearning Programme for Stroke.* 2nd ed. Oxford: Butterworth Heinemann; 1987.
17. Lennon S, Baxter D, Ashburn A. Physiotherapy based on the Bobath concept in stroke rehabilitation: a survey within the UK. *Journal of Disability and Rehabilitation.* 2001;23:254-62.
18. Sackley CM, Lincoln NB. Physiotherapy for stroke patients: A survey of current practice. *Physiotherapy Theory & Practice.* 1996;12:87-96.
19. Van Vliet PM, Lincoln NB, Foxall A. Comparison of Bobath based and movement science based treatment for stroke: a randomised controlled trial. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 2005;76:503-8.
20. Coote S, Stokes E. Physiotherapy for upper extremity dysfunction following stroke. *Physical Therapy Reviews.* 2001;6:63-69.
21. Kwakkel G, Wagenaar RC, Koelman TW, Lankhorst GJ, Koetsier JC. Effects of intensity of rehabilitation after stroke, a research synthesis. *Stroke.* 1997;28:1550-6.
22. Sunderland A, Tinson DJ, Fletcher D, Langton-Hewer R, Wade DT. Enhanced physical therapy improves arm function after stroke, a randomised controlled trial. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 1992;55:530-5.
23. Lincoln NB, Parry RH. Randomised, controlled trial to evaluate increased intensity of physiotherapy treatment of arm function after stroke. *Stroke.* 1999;30:2242-3.
24. Richards L, Pohl P. Therapeutic interventions to improve upper extremity recovery and function. *Clin Geriatr Med.* 1999;15:819-32.
25. Sterr A, Freivogel S. Motor-improvement following intensive training in low-functioning chronic hemiparesis. *Neurology.* 2003;61:842-4.
26. Aisen ML, Krebs HI, McDowell F, Hogan N, Volpe BT. The effect of robot assisted therapy & rehabilitative training on motor recovery following a stroke. *Arch Neurol.* 1997;54:443-6.
27. Krebs HI, Volpe BT, Aisen ML, Hogan N. Increasing productivity and quality of care: Robot-aided neurorehabilitation. *J Rehabil Res Dev.* 2000;37:639-52.
28. Krebs HI, Palazzolo JJ, Dipietro L, Ferraro M, Krol J, Rannekleiv K, et al. Rehabilitation Robotics: Performance-Based Progressive Robot-Assisted Therapy. *Autonomous Robots.* 2003;15:7-20.
29. Volpe BT, Krebs HI, Hogan N, Edelstein L, Diels CM, Aisen ML. Robot training enhanced motor outcome in patients with stroke maintained over 3 years. *Neurology.* 1999;53:1874-6.
30. Volpe BT, Krebs HI, Hogan N, Edelstein L, Diels CM, Aisen ML. A novel approach to stroke rehabilitation: Robot aided sensorymotor stimulation. *Neurology.* 2000;54:1938-44.
31. Krebs HI, Ferraro M, Buerger SP, Newbery MJ, Makiyama A, Sandmann M, et al. Rehabilitation robotics: pilot trial of a spatial extension for MIT-Manus. *J Neuroengineering Rehabil.* 2004;1:5.
32. Krebs HI, Hogan N, Volpe BT, Aisen ML, Edelstein L, Diels C. Robot-aided Neuro-rehabilitation in Stroke: Three Year follow-up. ICORR Sixth international conference of rehabilitation robotics. 34-41, Stamford, CA.
33. Kording KP, Fukunaga I, Howard I, Ingram JN, Wolpert DM. A neuroeconomics approach to inferring utility functions in sensorimotor control. *Public Library of Science* 2004. *Biology* 2:e330.
34. Amirabdollahian F, Loureiro R, Harwin W. Minimum Jerk Trajectory Control for Rehabilitation and Haptic Applications. *Proc. IEEE Intl Conf. on Robotics & Automation,* 2002. Washington. p. 3380-5.
35. Loureiro R, Amirabdollahian F, Topping M, Driessen B, Harwin W. Upper Limb Robot Mediated Stroke Therapy—GENTLE/s Approach. *Autonomous Robots.* 2003;15:35-51.
36. Clower D, Boussaoud D. Selective Use of Perceptual Recalibration Versus Visuomotor Skill Acquisition. *J Neurophysiol.* 2000;84:2703-8.
37. Newport R, Hindle V, Jackson SR. Vision can improve the felt position of the unseen hand: Neurological evidence for links between vision and somatosensation in humans. *Current Biology.* 2001;11:975-80.
38. Stone SP, Wilson B, Wroot A, Halligan PW, Lange LS, Marshall JC, et al. The assessment of visuo-spatial neglect after acute stroke. *J Neurol Neurosurg Psych.* 1991;54:345-50.
39. Sunderland A, Wade DT, Langton Hewer R. The natural history of visual neglect after stroke. *International Disability Studies.* 1987;9:60-1.
40. Rubens AB. Caloric stimulation and unilateral visual neglect. *Neurology.* 1985;35:1019-24.
41. Vallar G, Sterzi R, Bottini G, Cappa S, Rusconi ML. Temporary remission of left hemianesthesia after vestibular stimulation. A sensory neglect phenomenon. *Cortex.* 1990;26:123-31.
42. Vallar G, Bottini G, Rusconi ML, Sterzi R. Exploring somatosensory hemineglect by vestibular stimulation. *Brain.* 1993;116:71-86. Erratum in: *Brain.* 1993;116:756.
43. Karnath HO, Christ K, Hartje W. Decrease of contralateral neglect by neck muscle vibration and spatial orientation of trunk midline. *Brain.* 1993;116:383-96.
44. Karnath HO, Sievering D, Fetter M. The interactive contribution of neck muscle proprioception and vestibular stimulation to subjective «straight ahead» orientation in man. *Exp Brain Res.* 1994;101:140-6.
45. Pizzamiglio L, Frasca R, Guariglia C, Incoccia C, Antonucci G. Effect of optokinetic stimulation in patients with visual neglect. *Cortex.* 1990;26:535-40.
46. Vallar G, Antonucci G, Guariglia C, Pizzamiglio L. Deficits of position sense, unilateral neglect and optokinetic stimulation. *Neuropsychologia.* 1993;31:1191-200.
47. Vallar G, Guariglia C, Magnotti L, Pizzamiglio L. Optokinetic stimulation affects both vertical and horizontal deficits of position sense in unilateral neglect. *Cortex.* 1995;31:669-83.
48. Karnath HO. Optokinetic stimulation influences the disturbed perception of body orientation in spatial neglect. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 1996;60:217-20.
49. Rossetti Y, Rode G, Pisella L, Farne A, Li L, Boisson D, et al. Prism adaptation to a rightward optical deviation rehabilitates left hemispatial neglect. *Nature.* 1998;395:166-9.
50. Rode G, Rossetti Y, Li L, Boisson D. Improvement of mental imagery after prism exposure in neglect: a case study. *Behav Neurol.* 1998;11:251-8.
51. Skinner BF. *Science and human behaviour.* New York: Macmillan; 1953.
52. Cohen SL, Richardson J, Klebez J, Febbo S, Tucker D. EMG biofeedback: the effects of CRF, FR, VR, FI, and VI schedules of reinforcement on the acquisition and extinction of increases in forearm muscle tension. *Appl Psychophysiol Biofeedback.* 2001;26:179-94.
53. Rose DK, Winstein CJ. Bimanual Training After Stroke: Are Two Hands Better Than One? *Top Stroke Rehabil.* 2004;11:20-30.
54. Burgar CG, Lum PS, Shor PC, Machiel Van der Loos HF. Development of robots for rehabilitation therapy: the Palo Alto VA/Stanford experience. *J Rehabil Res Dev.* 2000;37:663-73.
55. Jackson GM, Jackson SR, Husain M, Harvey M, Kramer T, Dow L. The coordination of bimanual prehension movements in a centrally deafferented patient. *Brain.* 2000;123:380-93.
56. Jackson GM, Jackson SR, Newport R, Harvey M. Co-ordination of bimanual movements in a centrally deafferented patient executing open-loop reach-to-grasp movements. *Acta Psychol.* 2002;110:231-46.
57. Stein J, Krebs HI, Frontera WR, Fasoli SE, Hughes R, Hogan N. Comparison of two techniques of robot-aided upper limb exercise training after stroke. *Am J Phys Med Rehabil.* 2004;83:720-8.
58. Patton JL, Stoykov ME, Kovic M, Mussa-Ivaldi FA. Evaluation of robotic training forces that either enhance or reduce error in chronic hemiparetic stroke survivors. *Exp Brain Res.* 2006;168:368-83.
59. Bock O. Load compensation in human goal-directed arm movements. *Behav Brain Res.* 1990;41:167-77.
60. Flash T, Gurevitch F. Arm movement and stiffness adaptation to external loads. E: *Proceedings of the 13th IEEE engineering in medicine and biology conference, Orlando, 1992.* p. 885-6.
61. Shadmehr R, Mussa-Ivaldi FA. Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *J Neurosci.* 1994;14:3208-24.
62. Gandolfo F, Mussa-Ivaldi FA, Bizzi E. Motor learning by field approximation. *Proc Nat Acad Sci USA.* 1996;93:3843-6.
63. Condit MA, Gandolfo F, Mussa-Ivaldi FA. The motor system does not learn the dynamics of the arm by rote memorization of past experience. *J Neurophysiol.* 1997;78:554-60.