



REVISIÓN

Teorías y modelos de control y aprendizaje motor. Aplicaciones clínicas en neurorrehabilitación

R. Cano-de-la-Cuerda^{a,*}, A. Molero-Sánchez^{a,b}, M. Carratalá-Tejada^a,
I.M. Alguacil-Diego^a, F. Molina-Rueda^a, J.C. Miangolarra-Page^{a,c} y D. Torricelli^d

^a Laboratorio de Análisis del Movimiento, Biomecánica, Ergonomía y Control Motor (LAMBECOM), Departamento de Fisioterapia, Terapia Ocupacional, Medicina Física y Rehabilitación, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Rey Juan Carlos, Alcorcón, Madrid, España

^b Servicio de Rehabilitación, Hospital Universitario Ramón y Cajal, Madrid, España

^c Servicio de Rehabilitación, Hospital Universitario Fuenlabrada, Madrid, España

^d Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Centro de Automática y Robótica, Grupo Bioingeniería, Arganda del Rey, Madrid, España

Recibido el 22 de septiembre de 2011; aceptado el 20 de diciembre de 2011

Accesible en línea el 18 de febrero de 2012

PALABRAS CLAVE

Aprendizaje motor;
Control Motor;
Modelos;
Neurorrehabilitación;
Patología
neurológica;
Teorías

Resumen

Introducción: En las últimas décadas ha existido un especial interés por las teorías que podrían explicar el gobierno del control motor y sus aplicaciones. Estas teorías suelen basarse en modelos de función cerebral, reflejando criterios filosóficamente diferentes sobre la forma en la que el movimiento es controlado por el cerebro, enfatizando cada una de ellas en los distintos componentes neurales del movimiento. Asimismo, en el contexto de las neurociencias, toma relevancia el concepto de aprendizaje motor, considerado como el conjunto de procesos internos asociados a la práctica, y la experiencia, que producen cambios relativamente permanentes en la capacidad de producir actividades motoras, a través de una habilidad específica. Por lo que ambos, control y aprendizaje motor, se posicionan como campos de estudio fundamentales para los profesionales sanitarios en el campo de la neurorrehabilitación.

Desarrollo: Se describen las principales teorías de control motor como la teoría de la programación motora, la teoría de sistemas, la teoría de la acción dinámica o la teoría del procesamiento de distribución en paralelo, así como los factores que influyen en el aprendizaje motor y sus aplicaciones en neurorrehabilitación.

Conclusiones: En la actualidad no existe un consenso sobre qué teoría o modelo es definitorio en dar explicación al gobierno del control motor. Las teorías sobre el aprendizaje motor deben ser la base para la rehabilitación motora. Las nuevas líneas de investigación deben aplicar los conocimientos generados en los campos del control y aprendizaje motor en neurorrehabilitación.

© 2011 Sociedad Española de Neurología. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: roberto.cano@urjc.es (R. Cano-de-la-Cuerda).

KEYWORDS

Models;
 Motor control;
 Motor learning;
 Neurological
 diseases;
 Neuro-rehabilitation;
 Theories

Theories and control models and motor learning: clinical applications in neuro-rehabilitation

Abstract

Introduction: In recent decades there has been a special interest in theories that could explain the regulation of motor control, and their applications. These theories are often based on models of brain function, philosophically reflecting different criteria on how movement is controlled by the brain, each being emphasised in different neural components of the movement. The concept of motor learning, regarded as the set of internal processes associated with practice and experience that produce relatively permanent changes in the ability to produce motor activities through a specific skill, is also relevant in the context of neuroscience. Thus, both motor control and learning are seen as key fields of study for health professionals in the field of neuro-rehabilitation.

Development: The major theories of motor control are described, which include, motor programming theory, systems theory, the theory of dynamic action, and the theory of parallel distributed processing, as well as the factors that influence motor learning and its applications in neuro-rehabilitation.

Conclusions: At present there is no consensus on which theory or model defines the regulations to explain motor control. Theories of motor learning should be the basis for motor rehabilitation. The new research should apply the knowledge generated in the fields of control and motor learning in neuro-rehabilitation.

© 2011 Sociedad Española de Neurología. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Introducción

El estudio de la causa y la naturaleza del movimiento resultan esenciales para la práctica médica. Recientemente ha surgido un especial interés por las nuevas teorías del control motor (CM) y su aplicación. Sin embargo, la distancia entre la teoría y los procedimientos terapéuticos empleados en las alteraciones del CM se ha visto incrementada debido a las nuevas investigaciones en el campo de las neurociencias, no existiendo una teoría única entre la comunidad científica sobre el CM¹.

Los métodos específicos habitualmente empleados en neurorehabilitación vienen pues determinados por las suposiciones fundamentales sobre la causa y la naturaleza del movimiento de forma que la teoría se constituye en la base teórica de la práctica médica².

La neurorehabilitación en términos generales tendrá como objeto el mantenimiento de las habilidades existentes, la readquisición de habilidades perdidas y el aprendizaje de nuevas destrezas. Existen diversos factores que, siendo significativos desde el punto de vista de la neurorehabilitación, influyen en los procesos de aprendizaje motor, como las instrucciones verbales, características y variabilidad de la práctica, participación activa y motivación del individuo, la transferencia positiva/negativa del aprendizaje, el control postural, la memoria y el retroalimentación. Todos ellos son de aplicación clínica y son la base de las emergentes vías de investigación, así como de otras ya bien instauradas, en el reentrenamiento de la función sensitivo-motora del paciente neurológico.

El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis crítico de las teorías y modelos de control motor y aprendizaje motor descritos, así como estudiar sus potenciales aplicaciones clínicas en el campo de la neurorehabilitación, fundamentalmente en la readquisición del control postural y el equilibrio, la locomoción, el alcance, el agarre y la

manipulación. Por último, se describen las posibilidades reales de las nuevas tecnologías de aplicación en la patología neurológica.

Desarrollo**Teorías sobre el control motor**

Las diversas teorías sobre CM reflejan las concepciones existentes sobre la forma en la que el movimiento es controlado por el cerebro, enfatizando cada una de ellas en los distintos componentes neurales del movimiento¹. Los métodos específicos usados en neurorehabilitación vienen pues determinados por las suposiciones fundamentales sobre la causa y la naturaleza del movimiento de forma que la teoría se constituye en la base teórica de la práctica médica², la cual se encargará de verificar o no dichas teorías³. Las principales limitaciones e implicaciones clínicas de las teorías sobre CM se muestran en la [tabla 1](#).

Teoría refleja

En 1906, el neurofisiólogo Sir Charles Sherrington sentó las bases de la teoría refleja del CM⁴, en la que los reflejos eran los componentes básicos del comportamiento complejo para lograr un objetivo común⁵. Describió este comportamiento en función de reflejos compuestos y su combinación sucesiva o encadenamiento⁶⁻¹⁴. Un estímulo produciría una respuesta, la cual se transformaría en el estímulo de la siguiente respuesta.

Teoría jerárquica

Esta teoría sostiene que el sistema nervioso central (SNC) se organiza de forma jerárquica, en áreas de asociación superiores, corteza motora y niveles espinales de función motora, y cada nivel superior ejerce control sobre el nivel

Tabla 1 Limitaciones de las teorías sobre el control motor

Teorías de control motor	Limitaciones	Implicaciones clínicas
Teoría refleja	La consideración del reflejo como unidad básica del comportamiento no explica los movimientos espontáneos ni los voluntarios como formas aceptables de conducta No explica tampoco que un solo estímulo pueda resultar en respuestas variadas que dependen de un contexto y de los comandos descendentes o la capacidad de realizar movimientos nuevos	La recuperación del CM se basa en aumentar o reducir el efecto de los diversos reflejos durante las tareas motoras. El concepto Bobath se basó en parte en ella
Teoría jerárquica	No explica que un reflejo que se encuentra dentro del nivel inferior de la jerarquía es el que domine la función motora (reflejo de retirada)	Basados en la teoría jerárquica del CM se ha realizado el análisis de reflejos como parte de la evaluación clínica de pacientes con deficiencias neurológicas, utilizándose además como medio para calcular el nivel de maduración neural y predecir la capacidad funcional
Teoría de la programación motora	El concepto de programa motor no considera que el SNC deba tener en cuenta variables musculoesqueléticas y ambientales para lograr el control del movimiento. Comandos similares producirán movimientos distintos según varíen estas variables	Pone de relieve la capacidad de reaprender patrones de acción correctos ante trastornos de los niveles superiores de CM. El objetivo terapéutico deberá enfocarse hacia la recuperación de los movimientos claves para una actividad funcional, más que en la reeducación aislada de los músculos y si los niveles superiores de programas motores no están afectados, en encontrar efectores alternativos
Teoría de sistemas	No considera la interacción del organismo con el ambiente	Sugiere que la evaluación y tratamiento deben enfocarse no sólo en las deficiencias de los sistemas particulares que contribuyen al CM, sino en aquellas que interactúan en los múltiples sistemas, como las del sistema musculoesquelético
Teoría de la acción dinámica	Supone que la relación entre el sistema físico del sujeto y el ambiente donde opera determina principalmente su comportamiento	Las alteraciones en el comportamiento motor a menudo pueden ser explicadas en función de los principios físicos en vez de interpretarlas necesariamente según las estructuras neurales así, la comprensión de las propiedades físicas o dinámicas del cuerpo humano permitiría su uso en el tratamiento de los pacientes
Teoría del procesamiento de distribución en paralelo	Los modelos basados en esta teoría no imitan el procesamiento de la información durante el desempeño y el aprendizaje	Clínicamente, se podría utilizar este modelo para predecir la forma en que las lesiones del SN afectan a las funciones. Se ha indicado que en el cerebro los sistemas son altamente redundantes, capaces de operar con una pérdida de ejecución similar a la magnitud del daño, siendo esta una característica de ejecución natural de los modelos de PDP
Teoría orientada a la actividad	No informa sobre cuáles son las actividades fundamentales del SNC y los elementos esenciales que se controlan en una acción	Señala que la recuperación del CM debe enfocarse a actividades esencialmente funcionales
Teoría ecológica	Enfatiza poco en la organización y función del sistema nervioso	Describe al individuo como un explorador activo del medio ambiente y es esta exploración la que permite al sujeto desarrollar múltiples formas de realizar la actividad

SNC: sistema nervioso central.

menor, en una estricta jerarquía vertical, en la que las líneas de control no se cruzan y donde los niveles inferiores nunca ejercen dicho control³. En los años 40, Gesell¹⁵ y McGraw¹⁶ desarrollan la teoría de la neuromaduración del desarrollo. El desarrollo motor normal es atribuido a la creciente corticalización del SNC que produce la aparición de niveles superiores de control sobre los reflejos de nivel inferior, siendo la maduración del SNC el agente primario para el cambio en el desarrollo, minimizando la influencia de otros factores. La teoría jerárquica ha evolucionado, reconociéndose que cada nivel puede actuar sobre los otros dependiendo de la actividad, considerándose los reflejos no como único determinante del CM, sino solo uno de los diversos procesos esenciales para la generación y control del movimiento¹⁷.

Teorías de la programación motora

Las teorías más actuales acerca del CM se alejan de la idea de que sea un sistema fundamentalmente reactivo, habiendo comenzado a explorar la fisiología de las acciones en vez de la naturaleza de las reacciones. Se puede obtener una respuesta motora determinada tanto por un estímulo sensorial como por un proceso central en ausencia de un estímulo o impulso aferente, por lo que se debería hablar mejor de patrón motor central. Esta teoría, apoyada principalmente en el análisis de la locomoción en gatos¹⁸, sugiere que es posible el movimiento en ausencia de una acción refleja, de tal manera que la red espinal neural podría producir un ritmo locomotor sin estímulos sensoriales ni patrones descendentes del cerebro, pudiéndose realizar el movimiento sin retroalimentación³. Introduce el concepto de generadores de patrones centrales (GPC), circuitos neurales espinales específicos capaces de generar por sí mismos movimientos como el caminar y correr, y sobre los cuales los estímulos sensoriales entrantes ejercerían un importante papel modulador¹⁹⁻²⁴.

Teoría de sistemas

Esta teoría explica cómo no se puede entender el control neural del movimiento sin entender las características de los sistemas que se mueven. Afirma que «los movimientos no son dirigidos ni central ni periféricamente, sino que emergen de la interacción de muchos sistemas»²⁵. Se considera al cuerpo como un sistema mecánico sujeto a fuerzas externas (gravedad) e internas¹⁹. Un mismo comando central puede ocasionar movimientos muy dispares debido a la interacción entre las fuerzas externas y las variaciones de las condiciones iniciales o bien, el mismo movimiento podría ser originado por comandos distintos. La teoría intenta explicar cómo afectan las condiciones iniciales las características del movimiento²⁶.

Predice el comportamiento real mucho mejor que las teorías precedentes al considerar no solo los aportes del SN a la acción, sino también las contribuciones de diferentes sistemas así como las fuerzas de gravedad e inercia.

Teoría de la acción dinámica

Del estudio de las sinergias surge esta teoría que observa a la persona en movimiento desde una nueva perspectiva³. Considerando el principio de autoorganización, afirma que cuando un sistema de partes individuales se une, sus

elementos se comportan colectivamente en forma ordenada, no siendo necesario un centro superior que envíe las instrucciones para lograr la acción coordinada^{27,28}. Propone que el movimiento surge como resultado de elementos que interactúan, sin la necesidad de programas motores. Esta acción dinámica trata de encontrar descripciones matemáticas de estos sistemas autoorganizados que seguirían un comportamiento no lineal, situación en la cual, cuando uno de los parámetros se altera y alcanza un valor crítico, el sistema entra en un patrón de comportamiento completamente nuevo. A través de estas formulaciones matemáticas sería posible predecir las formas en que un sistema dado actuará en diferentes situaciones. La perspectiva de la acción dinámica reduce la importancia de las nociones de comandos provenientes del SNC para controlar el movimiento y busca explicaciones físicas que también puedan contribuir a las características del movimiento.

Teoría del procesamiento de distribución en paralelo

La teoría del procesamiento de distribución en paralelo (PDP) describe la forma en que el SN procesa la información para actuar. El SN operaría tanto mediante procesos en serie (procesando la información a través de una vía única), como en paralelo, interpretando la información por medio de vías múltiples que la analizarían simultáneamente en diferentes formas. El supuesto fundamental es que el cerebro es un ordenador con células que interactúan en diversas formas y las redes neuronales son los sistemas computacionales esenciales del cerebro^{29,30}. La estrategia ha sido desarrollar modelos matemáticos simplificados de sistemas cerebrales y posteriormente estudiar estos para comprender la manera en que varios problemas de cálculo pueden ser resueltos por tales mecanismos²⁹⁻³¹. Los modelos consisten en elementos que están conectados por circuitos. Al igual que las sinapsis neurales, cada elemento puede ser afectado por los otros de forma positiva o negativa en distinta magnitud. Estos elementos se distribuirían en neuronas sensoriales, interneuronas y motoras. La eficiencia del desempeño dependerá de la cantidad de conexiones de salida y la fortaleza de la conexión³.

Teoría orientada a la actividad

Greene³² indicó la necesidad de una teoría que explicase cómo los circuitos neuronales operaban para lograr una acción, lo que proporcionaría la base para una imagen más coherente del sistema motor. El método orientado a la actividad se apoya en el reconocimiento de que el objetivo del CM es el dominio del movimiento para realizar una acción particular, no para efectuar movimientos por el solo hecho de moverse. El control del movimiento se organizaría alrededor de comportamientos funcionales dirigidos a objetivos³.

Teoría ecológica

En los años sesenta, Gibson³³ explora la forma en que nuestros sistemas motores nos permiten interactuar más efectivamente con el medio ambiente a fin de tener un comportamiento orientado al objetivo. Su investigación se centró en cómo detectamos la información del entorno pertinente para nuestras acciones y cómo la utilizamos para controlar nuestros movimientos³⁴. El individuo explora activamente su entorno, el cual, a su vez, sostiene la actividad

del individuo, de tal manera que las acciones están orientadas al ambiente.

Aprendizaje motor

El aprendizaje motor (AM) se define como el conjunto de procesos internos asociados a la práctica y la experiencia, que producen cambios relativamente permanentes en la capacidad de producir actividades motoras, a través de una habilidad específica. Lo que aprendemos se retiene o almacena en nuestro cerebro y constituye lo que denominamos memoria^{35,36}, no considerándose como aprendizaje las modificaciones a corto plazo³⁷⁻³⁹.

La neurorrehabilitación tendrá como objeto el mantenimiento de las habilidades existentes, la readquisición de habilidades perdidas y el aprendizaje de nuevas destrezas. Se considera generalmente que una habilidad es una característica o rasgo relativamente estable, típicamente asociado a un componente genético y que no puede alterarse fácilmente mediante la práctica o la experiencia⁴⁰. Otra manera de entender el concepto de habilidad es distinguiéndolo del de destreza. Al contrario que la primera, la destreza puede ser modificada mediante la práctica o la experiencia, de hecho, y de igual modo, puede ser adquirida a través de estas^{41,42}.

Muchos factores influyen en el AM, como la edad, la raza, la cultura o la predisposición genética. Cada persona posee sus destrezas como resultado del proceso de su aprendizaje⁴³.

Teorías sobre el aprendizaje motor

Modelo de los tres estadios de Fitts y Posner^{37,38}. Estos autores sugieren que existen tres etapas principales en el AM.

En la etapa cognitiva el paciente aprende una nueva destreza o reaprende una antigua. El individuo necesita practicar con frecuencia una tarea bajo supervisión y guía externa, siendo importante el cometer errores y saber corregirlos. En la etapa asociativa el paciente consigue dirigir el programa dentro de restricciones ambientales específicas. Disminuirá el número de errores en la actividad y logrará realizar con menor esfuerzo la ejecución de la tarea. Los individuos comienzan a comprender como se interrelacionan los diferentes componentes de la destreza. En la etapa autónoma el paciente consigue moverse dentro de una variedad de ambientes, manteniendo el control en todo el programa. El verdadero sello del aprendizaje es la capacidad de retener la destreza y generalizarla a diferentes contextos gracias a la automatización, puesto que la práctica en la vida cotidiana es generalmente aleatoria³⁸.

Modelo de sistema de tres fases de Berstein. Según esta teoría, el énfasis está en controlar los grados de libertad, es decir, el número independiente de movimientos necesarios para completar una acción, como un componente central del aprendizaje de una nueva destreza motora. Este modelo de aprendizaje plantea tres fases. En la fase inicial, el individuo simplifica el movimiento reduciendo los grados de libertad. En la fase avanzada el sujeto comienza a ganar ciertos grados de libertad, permitiendo el movimiento en mayor número de articulaciones incluidas en la tarea. Y, por último, la fase experto es aquella en la que el individuo posee todos

los grados de libertad necesarios para llevar a cabo la tarea, con la mayor efectividad y de manera coordinada.

Modelo de dos fases de Gentile. La primera fase incluye la comprensión del objetivo de la tarea, el desarrollo de las estrategias de movimiento apropiadas para conseguir el objetivo, así como la interpretación de las características del entorno críticas para la organización del movimiento. En la segunda fase, denominada de fijación o fase de diversificación, el objetivo del sujeto es redefinir el movimiento, lo cual incluye tanto el desarrollo de la capacidad de adaptar el movimiento a los cambios de la tarea y del entorno, como desarrollar la tarea consistente y eficientemente.

Fases en la formación del programa motor. Diversos investigadores se han planteado qué cambios jerárquicos podrían ocurrir en el control del movimiento cuando los programas motores se unen durante el aprendizaje de una nueva tarea⁴⁰. Los programas motores que rigen una conducta compleja podrían ser creados a través de la combinación de programas motores que controlan unidades más pequeñas de la conducta, hasta completar el control total de ésta como una sola unidad⁴⁰.

Factores que influyen en el aprendizaje motor

Existen diversos factores que influyen en los procesos de AM, como las instrucciones verbales, las características y la variabilidad de la práctica, la participación activa y la motivación del individuo, la posibilidad de cometer errores, el control postural, la memoria y el retroalimentación (tabla 2).

Las instrucciones verbales facilitan a la persona que centre su atención en determinados objetivos y condicionan las estrategias de aprendizaje que vaya a emplear a la hora de realizar un movimiento^{38,44}. En cuanto a las características y variabilidad de la práctica, resulta relevante plantear una tarea que conlleve repetición, teniendo en cuenta el concepto de «repetir sin repetir», es decir, la práctica debe tener un control de los parámetros que se han ido modificando, pues debe suponer un reto para el paciente y ser extrapolable a diferentes entornos y situaciones. En aquellos casos en los que la práctica física no sea posible, se ha sugerido que la práctica mental es una forma efectiva de estimular el aprendizaje⁴⁵. El aprendizaje puede ser facilitado o interrumpido por el contexto. Diferentes contextos producirán un mayor desarrollo del aprendizaje, resultando ser este más general y enriquecedor. Por esta razón, la práctica en el entorno clínico debe incluir condiciones variables, con el fin de que el aprendizaje pueda ser transferido a diversas situaciones cambiantes. De manera que la cantidad de transferencia depende de la similitud ente el entorno clínico y el entorno real⁴⁶.

Otro de los conceptos importantes relacionado con el AM es la participación activa del paciente en la tarea que se debe desarrollar. La motivación e implicación del mismo es crucial para la ejecución de la tarea o actividad, la resolución y superación del problema. La participación activa realza el procesamiento del aprendizaje y ayuda a mantener una continuidad del mismo.

La posibilidad de cometer errores durante la ejecución de una nueva actividad, así como reportar al paciente posibles soluciones o fomentar a que él mismo las proponga, supone un añadido en el trabajo del AM de nuevas destrezas³⁸. Un

Tabla 2 Aprendizaje motor**Factores que influyen en el aprendizaje motor**

Instrucciones verbales: necesidad de preservación de la capacidad de atención y de observación directa

Características y variabilidad de la práctica: entre las diferentes modalidades de práctica, la práctica distribuida, con tiempos de descanso prolongados entre los tiempos de trabajo, parece lograr incrementar la transferencia del aprendizaje, en comparación con la ejecución de tareas continuas, sin descanso. La fatiga parece ser una de las razones que justifique la práctica distribuida, además un tiempo prolongado dedicado a la práctica puede tener un mayor margen de error debido al agotamiento tanto físico como mental

Participación activa y motivación: las hipótesis generales sobre la práctica en relación al AM parecen afirmar que los resultados en el aprendizaje obtenido dependen del tiempo total empleado en este

Posibilidad de cometer errores: realizar un análisis de cada actividad o tarea que se quiera llevar a cabo determinará qué componentes de movimiento se deberá enfatizar durante el aprendizaje

Control postural: es definido como el control de la posición del cuerpo en el espacio con propósito de equilibrio y orientación

Memoria: la memoria es considerada un elemento clave en el AM

Retroalimentación: tiene por objeto motivar la consecución de objetivos, reforzar el desarrollo de una actividad (el refuerzo positivo, verbal o no verbal, produce mayor progreso en el aprendizaje que el refuerzo negativo) e informar acerca del desarrollo de la acción. Puesto que puede crear dependencia en el proceso de aprendizaje, el terapeuta debe ser capaz de proporcionar éste sólo cuando sea necesario

Tabla 3 Retroalimentación extrínseco

Proporciona información acerca del progreso individual en el aprendizaje de la actividad, lo cual favorece la motivación

Proporciona información de las partes que componen la acción, lo que permite al individuo realizar una representación mental de la actividad, así como interpretar sus posibilidades acerca de la consecución de los objetivos

Proporciona refuerzo positivo, cuando se transmite al sujeto información acerca de la correcta ejecución de las tareas. Esto tiene un efecto inmediato sobre la motivación del individuo, así como sobre la atención y la concentración dedicada a la tarea

El retroalimentación reiterado sobre corrección de errores puede generar dependencia y evitar que el sujeto experimente y evalúe por sí mismo las características de su acción. Para evitar la dependencia, el retroalimentación sólo debe otorgarse cuando sea necesario, en función de la complejidad de las tareas y la experiencia del individuo. Por lo tanto, el refuerzo debe ser intermitente, evitando producir retroalimentación en cada ejecución

correcto control postural^{47,48}, así como un adecuado estado de la memoria, son importantes en el proceso de aprendizaje de un nuevo acto motor o en la readquisición del mismo⁴⁹.

Llamamos retroalimentación a la información que surge como resultado del movimiento (tabla 3). Podemos distinguir entre retroalimentación intrínseco, como consecuencia del movimiento que se produce (vía exteroceptiva y propioceptiva) que permite ajustes posturales; y retroalimentación extrínseco, considerado como toda información proporcionada por una fuente externa. Su objetivo es comunicar información al paciente sobre el resultado del movimiento ejecutado, completando la información intrínseca. Existen dos categorías dentro de este, el conocimiento de resultados, considerado como toda información verbal sobre el resultado de la acción y de especial importancia cuando el retroalimentación intrínseco está disminuido, y el conocimiento de ejecución que se relaciona con los patrones de movimiento para conseguir una tarea e informa sobre la calidad de sus movimientos^{50,51}. El retroalimentación extrínseco es esencial cuando el origen del retroalimentación intrínseco de una persona está disminuido o distorsionado, frecuente en pacientes con deterioro neurológico. Durante

cualquier proceso de aprendizaje, el sujeto debe recibir algún tipo de información sobre el error desde la fuente intrínseca o extrínseca. Las características del retroalimentación extrínseco, las cuales potencian las habilidades cognitivas del paciente, se resumen en la tabla 3.

Los niños usan el retroalimentación de distinto modo a los adultos, pues estos se benefician más de un retroalimentación reducido, mientras que los niños requieren un retroalimentación más continuo pero menos preciso. El retroalimentación reducido incrementa el esfuerzo cognitivo del sujeto, ya que cuando el retroalimentación es ocultado, la persona necesita atender e interpretar la información intrínseca como resultado de la habilidad desempeñada. Este incremento del esfuerzo cognitivo propicia el cambio óptimo en los adultos, potenciando el AM, lo que no ocurre en los niños. Estos requieren un mayor número ensayos prácticos con retroalimentación para formar una representación más precisa y estable de la tarea; Posteriormente, el retroalimentación se debe reducir progresivamente para estimular el esfuerzo cognitivo y el AM. La capacidad de un sujeto para procesar la información y atender a la información intrínseca derivada de la tarea, condiciona el refuerzo extrínseco otorgado^{50,51}.

Aplicaciones clínicas de las teorías del control y aprendizaje motor en neurorrehabilitación

Debe existir una transferencia continua del conocimiento científico a la práctica clínica para proponer nuevas estrategias terapéuticas que refuercen y fortalezcan las ya existentes. Por razones metodológicas se describirán por separado las estrategias terapéuticas encaminadas a recuperar o mejorar las capacidades de control postural y equilibrio, de la locomoción y de la manipulación.

Control postural y equilibrio

La literatura parece mostrar⁵²⁻⁵⁶ que el ejercicio físico es una forma efectiva de mejorar el equilibrio en los pacientes neurológicos, y estas mejoras podrían potencialmente mejorar la funcionalidad y reducir el número de caídas. La efectividad de estos programas depende de la inclusión de ejercicios multidimensionales más que los que se dirigen a un solo aspecto⁵⁷. A esta forma de trabajo tradicional, se han añadido nuevas metodologías, de forma paralela, con una concepción más global, como son el Tai Chi^{58,59}, el entrenamiento sensorial⁶⁰ y el entrenamiento en tarea doble (tarea motora más cognitiva)⁶¹. En la actualidad, existe evidencia científica de la utilidad de los sistemas instrumentados, como la posturografía dinámica computarizada. Se están desarrollando estudios en los que se intenta demostrar que dichos sistemas son también válidos como herramienta de reentrenamiento⁶².

Locomoción

La intervención tiene como objetivo la optimización de la marcha mediante la prevención del acortamiento de los tejidos blandos, el aumento de la fuerza y del control muscular y el entrenamiento del ritmo y coordinación. Esto se consigue mediante la combinación de ejercicios de estiramientos, de fuerza, de carga y práctica de la marcha⁶³.

Tradicionalmente, la terapia de fortalecimiento se realizaba de forma manual mediante ejercicios contra resistencia o mediante la aplicación de sistemas de suspensión y poleas, utilizando muelles y pesos. Técnicas basadas en el concepto Bobath⁶⁴ o en la facilitación neuromuscular propioceptiva⁶⁵ siguen utilizándose; sin embargo, existen pocos trabajos sobre la efectividad de estas técnicas. En la actualidad, la metodología es algo más sofisticada, y va desde la utilización de bandas elásticas a ejercicios instrumentales realizados con equipos isocinéticos, pasando por estimulación eléctrica. Si bien se ha comprobado que el fortalecimiento de un músculo o grupo muscular produce aumento de la fuerza, no existe evidencia de una correlación en el aumento de la función; es necesario entrenar las sinergias requeridas para caminar en cadena cerrada, de forma repetida, con frecuencia y bajo diferentes condiciones ambientales y de velocidad.

Carr y Shepherd⁶⁶ describen un programa de reaprendizaje motor en el ictus, basado en la práctica de tareas funcionales concretas. Basado en este concepto, parece apropiada la utilización, de forma precoz, de recursos tales como una pista de marcha (cinta sin fin)^{67,68} con soporte parcial del peso corporal, que puede combinarse con la electroestimulación eléctrica funcional (EEF) durante el entrenamiento⁶⁹ o la asistencia robotizada⁷⁰.

El reentrenamiento sensorial es una forma de implementar los beneficios de las terapias citadas. Existen estudios en los que se observa una mejora del equilibrio dinámico, en pacientes cuyo programa de ejercicios incluyen modificaciones sensoriales⁷¹. El uso del retroalimentación^{72,73} en programas de tratamiento ayuda al paciente a mejorar la capacidad de percepción del movimiento y supone un estímulo eficaz para mejorar la ejecución de la tarea.

Alcance, agarre y manipulación

Aunque el objetivo final de cualquier planteamiento terapéutico para el miembro superior será recuperar la función perdida o buscar compensaciones, podemos clasificar las intervenciones en aquellas que se focalizan en las deficiencias, las que tratan de recuperar la función y las que proponen la práctica de la tarea concreta.

Intervenciones dirigidas a las deficiencias

Para la reeducación de deficiencias motoras, se han utilizado diversos programas de ejercicios activos, pasivos, contra resistencias progresivas y sistemas isocinéticos^{74,75}, de liberación miofascial⁷⁶ o el Tai Chi. Para tratar la rigidez y el acortamiento de estructuras se emplean yesos, férulas y ortesis. El *bio*-retroalimentación y la EEF ayudan a reclutar músculos paréticos. Respecto de la reeducación sensorial, Byl et al.^{77,78} encontraron mejorías del 20% en la independencia funcional, en la actividad motora fina, en la discriminación sensorial y en el desempeño musculoesquelético.

Estrategias dirigidas a recuperar la función vía entrenamiento del movimiento

Stoikov et al.⁷⁹ usaron actividades posturales para mejorar la función prensil del miembro superior atáxico y encontraron mejorías significativas tras un programa de 4 semanas de duración. Otro ejemplo interesante es el programa para pacientes con disfunción vestibular propuesto por Herdman⁸⁰.

Desde los años setenta se han desarrollado diversas técnicas de facilitación del movimiento activo usando objetos reales y entrenando varias posibilidades de alcance y agarre con ejercicios de progresiva dificultad que impliquen distintas formas de manipulación⁸¹⁻⁸³. Rhoda Erhardt, terapeuta ocupacional, publicó de manera detallada el desarrollo de la secuencia para la suelta de objetos⁸⁴.

Práctica orientada al desempeño de la tarea

Dun et al.⁸⁵ desarrollaron un marco terapéutico basado en la teoría ecológica. Para mejorar la función es importante realizar la práctica de la tarea en sí misma, entrenando de esta manera, diversas actividades de la vida diaria^{86,87}.

Se han publicado multitud de estudios con resultados prometedores de mejora de la función del miembro superior, mediante la terapia por restricción del movimiento del lado sano (TRMLS). Sin embargo, una revisión sistemática reciente⁸⁸ en niños con hemiplejía solicita precaución ante su uso generalizado, aconsejando la realización de un mayor número de estudios con buen diseño metodológico. Asimismo, la revisión sistemática realizada por Langhorne, Coupar y Pollock parece indicar que la TRMLS produce beneficios clínicos en la función del brazo, no siendo tan claros para la mano en los pacientes con ictus⁸⁹. El entrenamiento bilateral o bimanual en pacientes con hemiplejía se ha comprobado que mejora la coordinación entre ambas manos y también de forma aislada, en el lado afectado^{90,91}. El tratamiento bimanual entra en contradicción de manera frontal con la TRMLS. Pero es posible que ambos tratamientos tengan cabida: el tratamiento bilateral en etapas precoces tras el ictus, para generar nuevas redes de reorganización del

córtex y la TRMLS en fases más crónicas, para la recuperación de redes en desuso.

Aplicación de la estimulación eléctrica neuromuscular

Estas aplicaciones funcionales se refieren a la activación de músculos paralizados en una secuencia y magnitud precisa para llevar a cabo directamente las tareas funcionales. De ahí el concepto de neuroprótesis, cuya aplicación permite sustituir la función motora del miembro superior e inferior para las tareas de autocuidado y la movilidad, la función de la vejiga y el control respiratorio⁹².

Bio-retroalimentación y realidad virtual

La terapia de biorretroalimentación orientada a tareas es ampliamente eficaz. La tecnología, llamada realidad virtual (VR), ofrece experiencias de la vida real, mejorando los resultados de los métodos clásicos de *bio-retroalimentación*. Sin embargo, los verdaderos beneficios terapéuticos de estos sistemas aún no se han probado por ensayos clínicos bien diseñados⁹³.

Interfaz cerebro-ordenador

Estos aparatos se conocen como *brain computer interfaces* (BMI). Existen estudios que intentan mejorar el conocimiento de la fisiología cortical que sostiene la intención humana y proporcionar señales para un control más complejo derivado de la señal cerebral. En una reciente revisión⁹⁴ los autores recogen el estado actual de BCI y detallan los estudios emergentes dirigidos a aumentar las aplicaciones clínicas futuras.

Aplicación de robótica en la neurorrehabilitación

Una revisión sistemática publicada recientemente⁹⁵ no encontró ningún efecto global significativo a favor de la terapia asistida por robot en la función del miembro superior y en las AVD en pacientes tras ictus, mas sí se observó una mejoría significativa en la parte proximal de la extremidad. En cuanto al empleo de sistemas robóticos para la mejora de la marcha de pacientes neurológicos, uno de los sistemas más conocidos es el Lokomat, dispositivo ortésico que simula y reproduce la marcha fisiológica del individuo, el cual ha sido objeto de diversas publicaciones científicas que parecen avalar sus resultados^{96,97}.

Conclusiones

En la actualidad no existe un consenso sobre qué teoría o modelo es definitorio en dar explicación al gobierno del CM. Las teorías sobre el aprendizaje motor deben ser la base para la rehabilitación motora. Estudios con buen diseño metodológico han evidenciado que el trasladar los hitos terapéuticos alcanzados en el paciente neurológico, a contextos relacionados con el sujeto, añadiendo variabilidad, participación activa, dando al paciente la posibilidad de cometer errores, otorgando retroalimentación e incentivando la motivación, como aspectos fundamentales en la disminución de los déficits funcionales en el paciente neurológico. Por lo que líneas de investigación, mediante aplicación de estos conceptos, pueden ser interesantes en

el uso de nuevos métodos y tecnologías en neurorrehabilitación.

Financiación

El presente estudio se ha realizado dentro de proyecto de investigación «Dispositivos híbridos neuroprotésicos y neurorobóticos para compensación funcional y rehabilitación de trastornos del movimiento (HYPER)», del programa CONSOLIDER-INGENIO 2010. Convocatoria 2009 del Ministerio de Ciencia e Innovación. IP: José Luis Pons Rovira. Instituto de Automática Industrial del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Abernethy B. The biophysical foundations of human movement. Illinois: Human Kinetics; 1997.
2. Nicolisky G. Teorías de control motor ¿nuevos conceptos en rehabilitación neuropediátrica kinésica del niño con parálisis cerebral? Arch Neurol Neuroc Neuropsiquiatr. 2007;14:41–7.
3. Shumway-Cook A, Wollacott MH. Motor Control: Theory and practical applications. Baltimore: Lippincott Williams and Wilkins; 2000.
4. Sherrington CS. The integrative action of the nervous system. New Haven: Yale University Press; 1906.
5. Brunnstrom S. Movement theory in hemiplegia: a neurophysiological approach. New York: Harper & Row; 1970.
6. Sherrington CS. Flexion-reflex of the limb, crossed extension-reflex, and reflex stepping and standing. J Physiol. 1910;40:28–121.
7. Sherrington CS. Strychnine and reflex inhibition of skeletal muscle. J Physiol. 1907;36:185–204.
8. Sherrington CS. Observations on the scratch reflex in the spinal dog. J Physiol. 1906;34:1–50.
9. Woodworth RS, Sherrington CS. A pseudoaffective reflex and its spinal path. J Physiol. 1904;31:234–43.
10. Sherrington CS. Qualitative difference of spinal reflex corresponding with qualitative difference of cutaneous stimulus. J Physiol. 1903;30:39–46.
11. Sherrington CS. Decerebrate rigidity and reflex coordination of movements. J Physiol. 1898;22:319–32.
12. Burke RE. Sir Charles Sherrington's the integrative action of the nervous system: a centenary appreciation. Brain. 2007;130:887–94.
13. Bobath K. The normal postural reflex mechanism and its deviation in children with cerebral palsy. Physiotherapy. 1971;57:515–25.
14. Graham JV, Eustace C, Brock K, Swain E, Irwin-Carruthers S. The Bobath concept in contemporary clinical practice. Top Stroke Rehabil. 2009;16:57–68.
15. Gesell. Developmental pediatrics. J Pediatr. 1947;30:188–94.
16. McGraw M. Neuromuscular maturation of the human infant. New York: Hafner; 1945.
17. Schmidt RA, Lee TD. Motor control and learning: a behavioural emphasis. Champaign: Human Kinetics; 2005.
18. Smith JL, Smith RF, Zernicke Hay M. Locomotion in exercised and nonexercised cats cordotomized at two or twelve weeks of age. Exp Neurol. 1982;16:394–413.

19. Aruin AS, Bernstein NA. The biomechanical foundations of a safe labour environment: Bernstein's vision in 1930. *Engine Control*. 2002;6:3–18.
20. Barbeau H, Wainberg M, Finch L. Description and application of a system for locomotor rehabilitation. *Med Biol Eng Comput*. 1987;25:341–4.
21. Barbeau H, Danakas M, Arsenault B. Effects of locomotor training in spinal cord injured subjects: a preliminary study. *ReSTOR Neurol Neurosci*. 1993;5:81–4.
22. Rossignol IS, Barbeau H. New approaches to locomotor rehabilitation in spinal cord injury [editorial]. *Ann Neurol*. 1995;37:555–6.
23. Edgerton VR, De Leon RD, Tillakaratne N, Recktenwald MR, Hodgson JA, Roy RR. Use-dependent plasticity in spinal stepping and standing. *ADV Neurol*. 1997;72:233–47.
24. Barbeau H. Locomotive training in neurorehabilitation: emerging rehabilitation concepts. *Neurorehabil Neural Repair*. 2003;17:3–11.
25. Bernstein N. The coordination and regulation of movement. London: Pergamon; 1967.
26. Edelman GM, Sporns O. Solving Bernstein's problem: a proposal for the development of coordinated movement by selection. *Child Development*. 1993;64:960–81.
27. Kamm K, Thelen, Jensen J. A dynamical systems approach to motor development. En: Rothstein JM, editor. *Movement science*. Alexandria: Suitable; 1991.
28. Perry SB. Clinical implications of a dynamical systems theory. *Neurol Report*. 1998;22:4–10.
29. León-Carrión J. Artificial neural networks and Luria neuropsychological theory. *Spanish Journal of Neuropsychology*. 2002;4:168–78.
30. Baron RJ. The brain computer. London: Lawrence Erlbaum; 1987.
31. McClelland JL, Rumelhart JL. DCs memory and representation of general and specific information. *Q J Exp Psychol*. 1996;114:159–88.
32. Greene PH. Why is it easy to control your arms. *J Mot Behav*. 1982;14:260–86.
33. Gibson JJ. The ecological approach to visual perception. Boston: Houghton Mifflin; 1979.
34. Latash ML. Evolution of motor control: from reflexes and motor programs to the equilibrium-point hypothesis. *J Hum Kinet*. 2008;19:3–24.
35. Strap M. Functional neuroanatomy of implicit learning: associative, motor, and habit. *Rev Neurol*. 2007;44:234–42.
36. Morgado I. Psychology of learning and memory: basics and recent advances. *Rev Neurol*. 2005;40:289–97.
37. Abernethy B, Hanrahan S, Kippers V, MacKinnon L, Pandy M. The biophysical foundations of human movement. Illinois: Human Kinetics; 1997.
38. Magill RA. Motor learning and control: concepts and applications. Hardcover: McGraw-Hill; 2007.
39. Schmidt RA, Wrisberg CA. *Motor Learning and Performance: A Problem-based Learning Approach*. Champaign: Human Kinetics; 2004.
40. Schmidt RA, Lee TD. *Motor control and learning. A behavioral emphasis*. Champaign: Human Kinetics; 2005.
41. Molina-Rueda F, Perez-Cruz S. Reflections on physiotherapy: motor learning, how to learn our patients. *Issues of physiotherapy*. 2010;39:211–8.
42. Greenwood R, Barnes MP, McMillan TM, Ward CD. *Handbook of neurological rehabilitation*. London: Psychology Press; 2003.
43. Gallahue DL, Ozmun JC. *Understanding motor development: Infants, children, adolescents and adults*. Boston: McGraw-Hill; 2006.
44. Umphred DA, Carlson C. *Neurorehabilitation for the physical therapist assistant*. London: Ed Slack; 2006.
45. Lee TD, Genovese ED. Distribution of practice in motor skill acquisition: Learning and performance effects reconsidered. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 1988;59:277–87.
46. Read TD. On the dynamics of motor learning research. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 1998;69:334–7.
47. Shumway-Cook A, Wollacott M. *Motor Control: Theory and practical applications*. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins; 2000.
48. Shumway-Cook A, Wollacott M. Attentional demands and postural control: the effect of sensory context. *J Gerontol*. 2000;55:10–6.
49. George A, Fitzpatrick D, Hall WC, Lamantia AS, Mcnamara JO, Purves D, et al. *Neuroscience*. Madrid: Panamerican Medical Publishing; 2008.
50. Flores A. *Feedback and motor learning: influence of actions taken prior to the receipt of the knowledge of the results in the learning and retention of motor skills [doctoral thesis]*. Barcelona: Universitat de Barcelona; 2005.
51. Sullivan JK, Kantak SS, Burtner AP. *Motor Learning in Children: Feedback Effects on Skill Acquisition*. *Physical Therapy*. 2008;88:720–32.
52. Whipple R. Improving balance in older adults: identifying the significant training stimuli. En: Masdeu JC, Sudarsky L, Wolfson L, editores. *Gait disorders in aging. Falls and therapeutic strategies*. Philadelphia: Lippincott-Raven; 1997.
53. Duncan P, Richards L, Wallace D. A randomized controlled pilot study of home-based exercise program for individuals with mild and moderate stroke. *Stroke*. 1998;29:2055–60.
54. Lamb Robertson MC, Gillespie WJ, Gillespie LD, Cumming RG, Rowe BH. Interventions for preventing falls in elderly people. *Cochrane Database Syst Rev*. 2003;4:CD000340.
55. Suzuki T, Kim H, Yoshida H, Ishizaki T. Randomized controlled trial of exercise intervention for the prevention of falls in community-dwelling elderly Japanese women. *J Bone Mineral Metabol*. 2004;22:602–11.
56. DeBolt LS, McCubbin JA. The effects of home-based resistance exercise on balance, power and mobility in adult with multiple sclerosis. *Arch Phys Med Rehab*. 2004;85:290–7.
57. Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor Control: Translating Research into Clinical Practice*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2007.
58. Lelard T, Doutrelot PL, David P, Ahmaidi S. Effects of a 12-week tai chi chuan program versus a balance training program on postural control and walking ability in older people. *Arch Phys Med Rehab*. 2010;91:9–14.
59. Hackney I, Earhart GM. Tai Chi improves balance and mobility in people with Parkinson's disease. *Gait Posture*. 2008;28:456–60.
60. Lin SI, Woollacott M. Association between sensorimotor function and functional and reactive balance control in the elderly. *Age & Ageing*. 2005;34:358–63.
61. Silsupadol P, Siu KC, Shumway-Cook A, Woollacott MH. Training of balance under single - and dual-task conditions in older adults with balance impairment. *Physical Therapy*. 2006;86:269–81.
62. Genthon N, Gissot AS, Froger J, Rougier P, Pérennou D. Posturography in patients with stroke: estimating the percentage of body weight on each foot from a single force platform. *Stroke*. 2008;39:489.
63. Leroux A, Pinet H. Task-oriented intervention in chronic stroke: changes in clinical and laboratory measures of balance and mobility. *Am J Phys Med Rehab*. 2006;85:820–30.
64. Paeth B. *Experiences with the Bobath concept*. Madrid: Panamericana; 2006.
65. Moors JS, F, Ballero, Jáuregui S, Float MP. *Rehabilitation in stroke [consultado 23/11/2011]*. Disponible en: <http://www.cfnavarra.es/salud/anales/textos/vol23/suple3/suple19.html>
66. Carr JH, Shepherd RB. *Neurological rehabilitation optimizing motor performance*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1998.

67. Moseley AM, Stark, Cameron ID, Pollock A. Treadmill training and body weight support for walking after stroke (Traducida Cochrane review). En: *The Cochrane Library Plus* 2007, number 4.
68. Jöbges EM, Spittler-Schneiders H, Renner CIE, Hummelsheim H. Clinical relevance of rehabilitation programs for patients with idiopathic Parkinson's syndrome (II): Tool-specific therapeutic approaches. *Parkinsonism Rel Res.* 2007;13:203–13.
69. Lindquist A, Prado C, Ricardo ML. Gait training combining partial body-weight support and functional electrical stimulation: effects on poststroke gait. *Phys Ther.* 2007;87:1144–54.
70. Eng JJ, Tang PF. Gait retraining strategies to optimize walking ability in people with stroke: a synthesis of the evidence. *Expert Rev Neurother.* 2007;7:1417–36.
71. Lynch EA, Hillier SL, Stiller K, Campanella RR, Fisher PH. Sensory retraining of the lower limb after acute stroke: a randomized controller pilot trial. *Arch Phys Med Rehab.* 2007;88:1101–7.
72. Woodford H, Price C. EMG biofeedback for the recovery of motor function after stroke (revision prophylaxis). En: *The Cochrane Library Plus* 2007, number 4.
73. Lünenburger L, Colombo G, Riener R. Biofeedback for robotic gait rehabilitation. *J Neuroeng Rehab.* 2007;4:1.
74. Engardt M, Knutsson Jonsson M, Sternhag M. Dynamic muscle strength training in stroke patients: effects of knee extension torque, electromyographic activity and motor function. *Arch Phys Med Rehab.* 1995;76:419–25.
75. Morris SL, Dodd KJ, Morris ME. Outcomes of progressive resistance strength training following stroke: a systematic review. *Clin Rehab.* 2004;18:27–39.
76. Manheim CJ, Lavett DK. *The myofascial release manual.* Parsippany: Slack; 1989.
77. Byl N. Effectiveness of sensory and motor rehabilitation of the upper limb following the principles of neuroplasticity stable poststroke patients. *Neurorehabil Neural Repair.* 2004;17:176–91.
78. Rosen B, Lundborg G. Early use of artificial sensibility to improve sensory recovery after repair of the median and ulnar nerve. *Scand J Plast Reconstr Hand Surg.* 2003;37:54–7.
79. Stoykov M, Stojakovich M, Stevens JA. Beneficial effects of posture intervention on prehensile action for an individual with ataxia resulting from brainstem stroke. *Neurorehabilitation.* 2005;20:85–9.
80. Herdman S. *Vestibular rehabilitation.* Philadelphia: FA Davis; 2000.
81. Levin MF, Michaelsen SM, Tie CM, Bami R. Use of the trunk for reaching targets placed within and beyond the reach in adult hemiparesis. *Exp Brain Res.* 2002;143:171–80.
82. Duff SV, Gordon AM. Learning of grasp control in children with cerebral palsy hemiparetic. *Dev Med Child Neurol.* 2003;45:404–12.
83. Exner EC, Henderson A. Cognition and motor skill. En: Henderson A, Pehoski C, editores. *Hand function in the child: foundations for remediation.* Philadelphia: Mosby; 1995.
84. Erhart MOP. *Developmental dysfunction hand: theory, assessment and treatment.* Tucson: Therapi Skill Builders; 1982.
85. Dunn W, Brown C, McGuigan A. The ecology of human performance: a framework for considering the effect of the context. *Am J Occup Ter.* 1994;48:595–607.
86. Case-Smith J. Effectiveness of school-based occupational therapy intervention on hand-writing. *Am J Occup Ter.* 2002;56:17–25.
87. Ma HI, Trombly CA. A synthesis of the effects of occupational therapy for persons with stroke, Part II: Remediation of impairments. *Am J Occup Ter.* 2002;56:260–74.
88. Charles J, Gordon AM. A critical review of constraint-induced movement therapy and forced use in children with hemiplegia. *Neural Plast.* 2005;12:245–61.
89. Langhorne P, Coupar F, Pollock A. Motor recovery after stroke: a systematic review. *Lancet Neurol.* 2009;8:741–54.
90. Combe-Waller S, Whittall J. Fine motor control in adults with and without chronic hemiparesis: baseline comparison to non-disabled adults and effects of bilateral arm training. *Arch Phys Med Rehabil.* 2004;85:1076–83.
91. Wetter S, Poole JL, Haaland KY. Functional implications of ipsilesional motor deficits after unilateral stroke. *Arch Phys Med Rehabil.* 2005;86:776–81.
92. Scheffler LR, Chae J. Neuromuscular electrical stimulation in neurorehabilitation. *Muscle Nerve.* 2007;35:562–90.
93. Huang H, Wolf SL, He J. Recent developments in biofeedback for neuromotor rehabilitation. *Neuroengineering Rehab.* 2006;3:11.
94. Leuthardt EC, Schalk G, Roland J, Rouse Moran DW. Evolution of brain-computer interfaces: going beyond classic motor physiology. *Neurosurg Focus.* 2009;27:4.
95. Kwakkel G, Krebs BJ, Kollen HI. Effects of robot-assisted therapy on upper limb after stroke recovery: a systematic review. *Neurorehabil Neural Repair.* 2008;22:111–21.
96. Pignolo L. Robotics in neuro-rehabilitation. *J Rehabil Med.* 2009;41:955–60.
97. Swinnen E, Duerinck S, Baeyens JP, Meeusen R, Kerckhofs E. Effectiveness of robot-assisted gait training in persons with spinal cord injury: a systematic review. *J Rehab Med.* 2010;42:520–6.