

Interacciones cognitivo-motoras: el papel de la representación motora

D.Y. Esparza^a, J. Larue^b

INTERACCIONES COGNITIVO-MOTORAS: EL PAPEL DE LA REPRESENTACIÓN MOTORA

Resumen. Introducción. En la última década, los estudios en neurociencia cognitiva han permitido avanzar considerablemente en el conocimiento de las interacciones entre la cognición y la acción. En particular, la representación motora aparece como uno de los procesos cognitivos implicados en la producción del movimiento. Esta representación motora se dedujo a partir de la comparación entre procesos cognitivos (p. ej., imaginación motora) y motores (p. ej., ejecución motora). Sin embargo, las interacciones entre dicha representación y otros procesos cognitivo-motores como la planificación motora ocultan la importancia de la función de la representación motora en la acción. Además, esta situación genera muchas veces una confusión en la interpretación de la función de la representación motora. En consecuencia, su rol exacto en la producción del movimiento no está bien establecido. Desarrollo. Para aclarar este papel, analizamos la imaginación, la preparación, la planificación, la ejecución motora, las *affordances* y los movimientos automatizados. A la vez, proponemos un esquema hipotético del funcionamiento de la representación motora durante la ejecución de un movimiento y de una acción. Conclusión. La representación motora puede considerarse como un componente activo de ciertos procesos cognitivo-motores que permite la actualización on line de la respuesta motora, así como la optimización y la adquisición de nuevas habilidades motoras. [REV NEUROL 2008; 46: 219-24]

Palabras clave. Acción. *Affordances*. Cognición. Movimiento automatizado. Planificación motora. Representación motora.

INTRODUCCIÓN

La noción de representación motora es una de las más polimorfas y ambiguas de la literatura psicológica y neurocientífica. En este artículo se analiza la función de la representación motora a partir de una serie de estudios que tratan sobre las interacciones cognitivo-motoras. Para ello, se revisan los datos procedentes de varios experimentos sobre la imaginación, la preparación, la planificación motora; las *affordances* y los movimientos automatizados. Finalmente, asociando los resultados de estos estudios, se presenta un esquema de funcionamiento de la representación motora durante la ejecución de un movimiento y de una acción.

IMAGINACIÓN MENTAL Y MOTORA

La imaginación mental es un proceso activo mediante el cual los seres humanos reviven sensaciones en presencia o no de estímulos externos [1]. Esta operación cognitiva es posible gracias a la utilización de una o varias modalidades sensoriales. Así, en función de la modalidad sensorial utilizada, la imaginación puede ser visual, cinestésica, auditiva, etc. Cada una de las modalidades sensoriales empleada durante la imaginación mental tiene propiedades diferentes [2]. Por ejemplo, la excitabilidad corticoespinal aumenta durante la utilización de la imaginación cinestésica, pero no durante el empleo de la imaginación visual [3]. Igualmente, la imaginación cinestésica permite determinar con más precisión la duración de las acciones *timing*, mientras que la imaginación visual describe mejor la forma [4].

Cuando la modalidad cinestésica está implicada en una labor de imaginación mental, los autores hacen referencia a la imaginación motora [5] o idiocinética. La imaginación motora constituye la simulación mental de una acción, sin la ejecución de una respuesta motora [6-8]. Por tanto, se considera como un estado dinámico dentro del cual la representación específica de una acción se reactiva en la memoria de trabajo [5]. En resumen, la imaginación motora o cinestésica constituye la reactivación de una acción en memoria de trabajo, sin la ejecución de una respuesta motora.

REPRESENTACIÓN MOTORA

Los estudios dedicados al análisis del tiempo de reacción durante la ejecución de una acción [9], así como los estudios sobre la imaginación mental [10,11], permitieron deducir la existencia y la estructura de las representaciones motoras. De este modo, la literatura en neurociencia cognitiva, al comparar la imaginación motora con la ejecución física de un movimiento, demuestra:

- La utilización de ciertos circuitos y estructuras anatómicas comunes [12,13].
- Las diferencias en el grado de activación de las diversas regiones corticales [14].
- La existencia de una representación mental interna del acto motor o, simplemente, de una representación motora [11,15,16].

Esta representación motora podría basarse en un conjunto de movimientos bien aprendidos, surgidos de un aprendizaje motor previo, implicando por definición la práctica repetida de una acción. Este aprendizaje puede producirse de manera implícita o explícita; la acción se automatiza y se almacena luego en la memoria, para utilizarse con posterioridad [17].

Se sugiere que la corteza parietal [16,18] y la corteza frontal [19,20] son los sustratos neuronales donde se almacenan las representaciones internas de las acciones. Por ejemplo, Karni et al [19] propusieron que las representaciones a largo plazo de las secuencias motoras se almacenan en el área motora primaria,

Aceptado tras revisión externa: 13.02.08.

^a Laboratoire de Neurosciences de l'Homme en Mouvement. Centre de Recherche en Activités Physiques et Sportives (CRAPS). Université de Caen. Caen. ^b Faculté du Sport et de l'Éducation Physique. Université d'Orléans. Orléans, Francia.

Correspondencia: Dr. Danilo Y. Esparza. Université de Caen (Basse Normandie), UFR STAPS. Campus II Boulevard Maréchal Juin. 14032 Caen cedex (France). Fax: 02 31 56 72 72. E-mail: wdaniloe@yahoo.es

© 2008, REVISTA DE NEUROLOGÍA

mientras que Penhune et al [20] sugirieron que estas representaciones se distribuyen en una red neuronal que incluye la corteza parietal, el área motora primaria, la corteza premotora y el área medial 8.

En esta revisión definiremos la representación motora como un conjunto de informaciones localizadas en redes neuronales específicas, donde la información se codifica constantemente en función de la labor a ejecutar y del objetivo a alcanzar.

INTERACCIONES COGNITIVO-MOTORAS

Diferentes tipos de estudios ponen en evidencia las interacciones entre la cognición y la motricidad. En particular, los estudios sobre la preparación, la planificación y la ejecución motora han permitido analizar la participación de las representaciones motoras en las acciones.

Con respecto a la preparación motora, Toni et al [21] demostraron que durante la ejecución de una labor que utiliza un movimiento previamente bien aprendido (considerado como una representación motora), la presentación de ítems sensoriales auditivos y visuales a diferentes intervalos de tiempo como guías para la ejecución correcta de una acción, influye en el rendimiento motor. La presentación de esta información sensorial, determinante para la ejecución de una respuesta motora correcta, afecta principalmente al tiempo de reacción para la ejecución de la acción. Este aumento en el tiempo de reacción se observó únicamente en condiciones experimentales, en las cuales los sujetos debían utilizar una memoria de trabajo para ejecutar la labor, pero no cuando los sujetos utilizaban una acción previamente preparada. Los autores sugirieron la existencia de una disociación funcional entre las labores que utilizan una memoria de trabajo y las que emplean una acción previamente preparada, y que las representaciones motoras son estructuras sólidas que participan en la acción, bien sea cuando los sujetos utilizan una memoria de trabajo, bien cuando utilizan una acción previamente preparada. En concordancia con este estudio, un artículo más reciente demostró que la preparación motora y una memoria motora (una acción previamente aprendida) pueden acoplarse simultáneamente cuando los sujetos han adquirido una práctica suficiente para efectuar la labor [22].

Otro tipo de estudios promulga que las representaciones motoras también se utilizan para la planificación motora [23] y para el control *on line* de las acciones [24]. Tras haber evitado la planificación anticipada de una acción perturbando la presentación de objetivos visuales, Heath et al [24] sugirieron que los individuos utilizan la representación de un objetivo visual para ejercer el control *on line* de las acciones. Está demostrado que la corteza prefrontal participa en el acoplamiento de informaciones sensoriales con las representaciones motoras durante la manipulación de estímulos visuales como objetivos [25] y en labores que involucran la participación de una memoria de trabajo [26,27]. El acceso *on line* a las representaciones motoras almacenadas por cortos períodos sería posible gracias a las conexiones entre la corteza prefrontal dorsal lateral y el área premotora dorsal [28].

Respecto a la ejecución motora, varios estudios demuestran que las *affordances* verbales y visuales influyen sobre el rendimiento motor. Las *affordances* corresponden a las propiedades intrínsecas de un objeto, que hacen referencia a ese objeto. Las *affordances* de los objetos evocan en los sujetos un conjunto de posibles acciones tomando en cuenta el medio ambiente, el individuo, sus intenciones y la labor a ejecutar. Diferentes tipos

de estudios demuestran que las *affordances* provocan la activación de representaciones motoras asociadas a los objetos [29-32]. Por ejemplo, se ha propuesto que la simple observación de un objeto para catalogarlo o comprenderlo es suficiente para activar una representación motora [33,34].

También se ha demostrado mediante análisis cinemáticos de los movimientos de aprehensión que las *affordances* influyen sobre la cinemática de la mano en función del tipo de movimiento de aprehensión a utilizar [29,30]. A pesar de que un objeto puede evocar múltiples *affordances*, existe una sola representación motora que determina la forma de la mano para tomar un objeto [35]. Incluso las *affordances* procedentes del lenguaje (la semántica de una palabra) son capaces de influir sobre el rendimiento motor. En especial, la lectura de verbos situados sobre un objetivo puede influir en la cinemática de la mano durante la ejecución de la acción [30].

Estudios de neuroimagen han permitido demostrar que las representaciones motoras procedentes de las *affordances* se activan automáticamente y que, además, involucran la participación de una red neuronal parietofrontal [33,34]. La intensidad de activación de esta red parietofrontal no es igual en todas las condiciones, sino que difiere en función del tipo de *affordance* evocada. Por ejemplo, la corteza premotora ventral izquierda se encuentra más activada durante la denominación o visualización de objetos que son manipulables (p. ej, un serrucho) [33, 36]. No obstante, la corteza prefrontal también puede ser activada por las *affordances*, en especial, cuando un gesto motor no es compatible con las *affordances* de un objeto [34]. En este caso se observó una activación significativa de la corteza prefrontal y de la corteza premotora dorsal.

Esta activación selectiva de la corteza parietal y de la corteza frontal se observó también durante la ejecución de movimientos automatizados [37-39]. Un movimiento se convierte en automatizado cuando es bien aprendido (un movimiento bien aprendido podría evocarse en forma de representación motora) y cuando el sujeto no necesita focalizar su atención para efectuarlo, lo que le permite realizar otras acciones al mismo tiempo [38,40]. Al contrario, se requiere una completa atención para el aprendizaje o reaprendizaje de una secuencia de movimiento, incluso si se trata del reaprendizaje de una secuencia de movimiento automatizada. Está demostrado que el aprendizaje o reaprendizaje de una secuencia de movimiento implica la activación de la corteza prefrontal [38].

La corteza prefrontal también se activa cuando el tiempo y la dirección del movimiento no están previamente especificados por índices externos, como por ejemplo durante la ejecución de movimientos autoiniciados (el sujeto decide cuándo comienza el movimiento) o autoseleccionados (el sujeto selecciona el tipo de movimiento) [41,42]. La participación de la corteza prefrontal en la ejecución de un movimiento autoiniciado automatizado [39] es mínima y podría tener una estrecha relación con su función de supervisión del comportamiento.

Debe destacarse que la corteza parietal y la corteza frontal se activan gracias a la evocación de representaciones motoras procedentes de las *affordances* o de la ejecución de ciertos tipos de movimientos bien aprendidos (p. ej., los movimientos de aprehensión). Las vías del sistema visual propuestas por Goodale [43] podrían desempeñar un papel determinante en las transformaciones de estas representaciones motoras en movimientos.

Así, la vía dorsal (occipitoparietal) o 'vía de la acción' participaría en la transformación visual de las características espe-

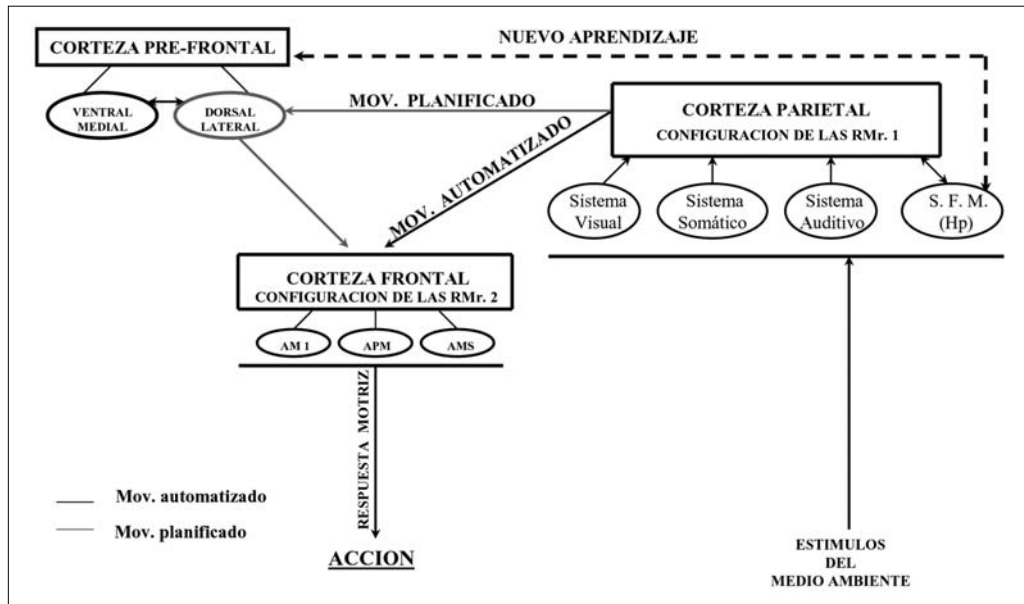


Figura 1. Tratamiento y configuración de la representación motora (RMr) en el área cortical. La ejecución de un movimiento automatizado involucra la participación de la corteza parietal y la corteza frontal, y la ejecución de un movimiento planificado activa las cortezas parietal, prefrontal y frontal. Sin embargo, ambas redes neuronales pueden activarse simultáneamente durante la ejecución de una acción. Existen dos sitios de configuración de las representaciones motoras, uno en la corteza parietal y otro en la corteza frontal. AM1: área motora primaria; APM: área premotora; AMS: área motora suplementaria; SFM: sistema funcional de la memoria; Hp: hipocampo.

de las informaciones procedentes de las diferentes áreas de asociación y de las zonas paralímbicas. Además, la corteza prefrontal supervisa el comportamiento y mantiene activa la información sensorial y la memoria de trabajo [50,51].

PAPEL DE LA REPRESENTACIÓN MOTORA EN EL MOVIMIENTO

Parece entonces que las representaciones motoras constituyen un conjunto de informaciones localizadas en redes neuronales específicas. Estas representaciones son objeto de tratamientos cognitivo-motores distintos, según el objetivo a alcanzar y la labor a ejecutar. Así, en proce-

cíficas de los objetos en acciones dirigidas hacia un fin. Por su parte, la vía ventral (occipitotemporal) o ‘vía de la percepción’ participaría en la representación perceptiva de los objetos (operaciones cognitivas) [44].

La vía dorsal modula el control *on line* de las acciones de habilidad dirigidas hacia los objetos situados dentro de coordenadas de referencia peripersonales. Al contrario, la vía ventral permite la evocación de representaciones perceptuales que contienen las características perdurables de los objetos y sus relaciones. No obstante, ambas vías están involucradas y cooperan en la producción de las acciones [43].

En resumen, la activación común de la corteza prefrontal en todos los procesos cerebrales mencionados anteriormente es de particular importancia. Sin embargo, su grado de participación parece estar sujeto al tipo de movimiento a efectuar (automatizado o planificado), al objetivo a alcanzar (fijo o móvil) y a la dificultad de la labor a efectuar (el aprendizaje de movimientos secuenciales). Por ejemplo, la preparación de un movimiento para alcanzar un objetivo móvil o la preparación motora para efectuar un movimiento secuencial no automatizado requieren de la atención (atención motora) [45,46]. Se necesita una gran actividad de la corteza prefrontal [47,48] y de la corteza parietal [45,46] para ejecutar labores que exigen atención. Por el contrario, se observa una activación menos importante de la corteza prefrontal durante la preparación de una labor familiar para el sujeto, para la cual se requiere poca o ninguna atención [49].

Otro ejemplo es la planificación de una acción, durante la cual la memoria de trabajo es necesaria para retener la información y organizar la secuencia temporal de la acción. Las labores que requieren la utilización de una memoria de trabajo involucran obligatoriamente la participación de la corteza prefrontal, en especial la corteza prefrontal dorsal lateral [26,27]. La corteza prefrontal interviene especialmente en la recuperación de las informaciones almacenadas en la memoria y en la integración

de los objetos en acciones dirigidas hacia un fin. Por su parte, la vía ventral (occipitotemporal) o ‘vía de la percepción’ participaría en la representación perceptiva de los objetos (operaciones cognitivas) [44].

La vía dorsal modula el control *on line* de las acciones de habilidad dirigidas hacia los objetos situados dentro de coordenadas de referencia peripersonales. Al contrario, la vía ventral permite la evocación de representaciones perceptuales que contienen las características perdurables de los objetos y sus relaciones. No obstante, ambas vías están involucradas y cooperan en la producción de las acciones [43].

En resumen, la activación común de la corteza prefrontal en todos los procesos cerebrales mencionados anteriormente es de particular importancia. Sin embargo, su grado de participación parece estar sujeto al tipo de movimiento a efectuar (automatizado o planificado), al objetivo a alcanzar (fijo o móvil) y a la dificultad de la labor a efectuar (el aprendizaje de movimientos secuenciales). Por ejemplo, la preparación de un movimiento para alcanzar un objetivo móvil o la preparación motora para efectuar un movimiento secuencial no automatizado requieren de la atención (atención motora) [45,46]. Se necesita una gran actividad de la corteza prefrontal [47,48] y de la corteza parietal [45,46] para ejecutar labores que exigen atención. Por el contrario, se observa una activación menos importante de la corteza prefrontal durante la preparación de una labor familiar para el sujeto, para la cual se requiere poca o ninguna atención [49].

Otro ejemplo es la planificación de una acción, durante la cual la memoria de trabajo es necesaria para retener la información y organizar la secuencia temporal de la acción. Las labores que requieren la utilización de una memoria de trabajo involucran obligatoriamente la participación de la corteza prefrontal, en especial la corteza prefrontal dorsal lateral [26,27]. La corteza prefrontal interviene especialmente en la recuperación de las informaciones almacenadas en la memoria y en la integración

so como la preparación y la planificación motora –donde la labor y el objetivo no están determinados, son manipulados o simplemente exigen una carga atencional importante–, las representaciones motoras involucran la participación activa de la corteza prefrontal. Al contrario, ciertos tipos de movimientos bien aprendidos no suponen niveles atencionales elevados y, por tanto, no requieren una participación activa de la corteza prefrontal; así, las representaciones motoras activan de manera preferencial y directa la corteza parietal y la corteza frontal.

Teniendo en cuenta que la automatización de un movimiento permite la ejecución de otras acciones al mismo tiempo [38, 40], podemos suponer que durante la ejecución de una acción determinada el sistema nervioso central, además de utilizar la representación motora que evoca un movimiento automatizado, las *affordances*, etc., también planifica el movimiento que permitirá finalizar dicha acción. Así, una acción que comienza con un movimiento automatizado permite concentrar la carga atencional en la planificación de la secuencia de la acción. Por tanto, deberíamos observar una activación de la corteza parietal y la corteza frontal una vez realizado el movimiento automatizado, así como una activación de las cortezas parietal, prefrontal y frontal al realizar el movimiento planificado –que se elabora durante el movimiento automatizado– (Fig. 1).

Por ejemplo, el embalaje de objetos durante un trabajo en cadena puede implicar la combinación de un movimiento automatizado (que puede considerarse una representación motora), como asir el objeto, y de un movimiento planificado, como depositarlo en una caja. Se necesita una carga atencional importante para introducir el objeto en la caja (movimiento planificado), pero no para tomarlo (movimiento automatizado).

Cuando el sujeto planifica el movimiento, su meta es cumplir con el objetivo de la acción (depositar correctamente el objeto dentro de la caja). En este caso, el sujeto es consciente del movimiento que está planificando; por tanto, este movimiento es

explícito. Al contrario, el movimiento automatizado tendrá un carácter implícito al no tratarse del objetivo de la acción y porque su ejecución no requiere de gran atención. En este ejemplo, la ejecución del movimiento automatizado (asir el objeto) puede constituir la representación motora interna (implícita) de una parte de la acción (el inicio). Sin embargo, el sujeto también puede imaginar la acción de embalar objetos fijándose en el objetivo de la acción (el final); así, la acción de depositar el objeto dentro de la caja también constituye una representación motora externa (explícita) –el objetivo de una acción siempre será explícito, bien sea por la ejecución misma de la acción o por el simple hecho de imaginarla–. En otras palabras, la imaginación motora de una acción de embalaje de objetos está conformada por la representación motora implícita (el movimiento automatizado) de una parte de la acción (el inicio) y la representación motora explícita (el movimiento planificado) del objetivo de la acción (el final). Ambas representaciones –implícita y explícita– forman una representación motora global de la acción. Sin embargo, el sujeto puede utilizar o imaginar solamente una parte de la acción, por ejemplo, el movimiento automatizado (asir el objeto). Cuando esto sucede, este movimiento que a la vez es una acción se convierte en explícito, ya que constituye el objetivo de la acción (Fig. 2).

Además, si una acción que incluye un movimiento automatizado y un movimiento planificado se practica lo suficiente, esta acción puede automatizarse y convertirse en un nuevo movimiento y, por consiguiente, en una nueva representación motora. De esta manera, la evocación de este nuevo movimiento automatizado en forma de representación motora puede constituir una parte de una nueva acción (Fig. 2). Este encadenamiento sucesivo entre las representaciones motoras y la planificación de la secuencia del movimiento para finalizar la acción podría constituir el fundamento del aprendizaje motor. Precisamente, la potenciación del aprendizaje motor podría ser la función más importante de la representación motora.

La actualización continua de la información garantiza un aprendizaje motor correcto. Las representaciones motoras estarían involucradas en esta actualización *on line* de la respuesta motora. Esta función de la representación motora es, probablemente, la que asegura la ejecución, planificación, preparación e imaginación de un movimiento o una acción en el menor tiempo posible. Si la representación motora participa en la actualización del movimiento, ésta también participaría en la corrección o reaprendizaje motor. Finalmente, otro de los roles de la representación motora asociado a la automatización del movimiento es la optimización temporal (ganancia de tiempo) en la producción de una acción.

El mecanismo descrito se basa en evidencias sobre el funcionamiento de las redes neuronales involucradas en la producción de los movimientos automatizados y planificados. No obstante, es difícil disociar este tratamiento simultáneo de la información procedente de los movimientos automatizados evocados en for-

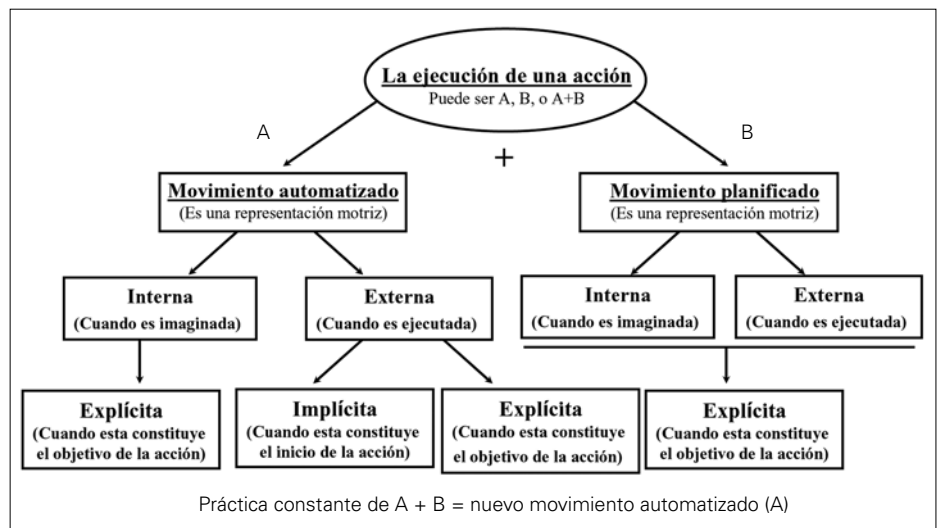


Figura 2. La representación de una acción global puede ser un movimiento automatizado, un movimiento planificado o la suma de estos movimientos. Por ejemplo, si el objetivo de una acción es ejecutar un movimiento automatizado, este movimiento constituye una representación motora explícita (externa).

ma de representación motora y de la planificación de la secuencia de la acción. Esto se debe a que dichos procesos involucran las mismas regiones corticales. Por ejemplo, la corteza parietal, además de ser activada por la evocación de una representación motora, necesita codificar al mismo tiempo los aspectos cinemáticos del movimiento [52]. De la misma manera, las neuronas situadas en la corteza motora deben codificar los aspectos dinámicos del movimiento, como la dirección y la fuerza [53]. Hay que recordar que el éxito en la ejecución de las acciones depende de la conjugación adecuada de todos estos componentes.

Así, en función de la labor a efectuar y del objetivo a alcanzar, las representaciones motoras pueden presentar dos modelos de activación cerebral. Un modelo activa la corteza parietal y la corteza frontal, y se utiliza para transferir las informaciones concernientes a las transformaciones sensoriomotoras [54], las *affordances* de los objetos [34] y los movimientos automatizados [39]; otro modelo activa la corteza parietal, la corteza prefrontal y la corteza frontal, y se utiliza para la planificación, la preparación y el aprendizaje motor [23,55,56] (Fig. 1). Estos modelos de activación cerebral pueden entrar en funcionamiento de una manera aislada o simultánea. Por ejemplo, el primer modelo puede activarse de manera aislada cuando el objetivo (la finalidad) de una acción se actualiza a través de la ejecución de un movimiento automatizado (es decir, un movimiento de aprehensión). Por el contrario, el segundo modelo se activa para la planificación de un nuevo movimiento o cuando se perturban o no se han determinado aún el objetivo o la labor a efectuar [21, 23,25,27] (Fig. 1). Cuando la labor o el objetivo son perturbados (experimentalmente o por el medio ambiente) durante la ejecución de las acciones que utilizan una representación motora previamente establecida, la activación cortical simultánea observada en las corteza parietal, prefrontal y frontal sugiere:

- Un tratamiento de las representaciones motoras en serie (corteza parietal-corteza prefrontal-corteza frontal) y en paralelo (corteza parietal-corteza frontal). Es decir, la evocación de una representación motora activa simultáneamente la corteza prefrontal y la corteza frontal (Fig. 1). Este tratamiento de las informaciones en serie y en paralelo utilizando acciones que implican representaciones motoras previas está so-

portado por estudios electrofisiológicos en humanos [22] y primates [57].

- La existencia de dos sitios de configuración de las representaciones motoras. El primero se localiza en la corteza parietal [14], donde el área intraparietal anterior desempeña un papel importante en la integración de las informaciones sensorio-motoras [58]. El segundo, de configuración o reconfiguración, se sitúa en la corteza frontal, donde la corteza premotora está implicada en la organización (acoplamiento) de las informaciones cognitivo-motoras [28] (Fig. 1). Más específicamente, la corteza premotora dorsal participaría en la representación del objetivo y en la selección de la trayectoria con respecto a las transformaciones sensoriomotoras [59,60]. Por el contrario, la corteza premotora ventral es importante en la percepción del espacio, la comprensión y la imitación de una acción, así como en la transformación de las propiedades intrínsecas de los objetos en acciones de la mano [61].

Finalmente, las representaciones motoras pueden transformarse en movimientos o en nuevas informaciones sensoriales dentro de la corteza frontal. Por ejemplo, se transforman en movimientos dentro de la corteza premotora dorsal gracias a las conexiones con el área motora primaria M1 y la médula espinal [28]. De la misma manera, las representaciones motoras pueden ser enviadas como una fuente de información sensorial adicional (Fig. 2).

CONCLUSIONES

La representación motora puede considerarse un componente activo de ciertos procesos cognitivo-motores, como la preparación, la planificación, la imaginación y la ejecución motora. De hecho, la representación motora se ajusta, en función del movimiento requerido, a la labor, al objetivo o a ambos. Estos ajustes constantes modifican y alimentan el tratamiento cognitivo de la

información, transformando simples movimientos en movimientos automatizados. De esta manera, la representación motora permite la actualización *on line* de la respuesta motora, así como la optimización y la adquisición de nuevas habilidades motoras.

Esta revisión complementa los trabajos precedentes sobre la representación motora y aporta nuevos elementos en cuanto al funcionamiento implícito y explícito de la representación motora en la ejecución de una acción. Así, puede reactivarse de manera interna o externa. La reactivación interna se realiza gracias a la imaginación motora, la misma que da un carácter explícito a la representación motora. La reactivación externa se realiza de manera implícita o explícita a través de la ejecución de la acción. La gran implicación de la corteza prefrontal hace que esta reactivación tenga un carácter explícito, ya que la corteza prefrontal ejerce un control cognitivo de las representaciones neuronales a través de un mecanismo general de selección atencional [62].

Los estudios que analizan las perturbaciones de una labor o del objetivo durante la ejecución de acciones que contienen representación motora permiten comprender mejor el tratamiento de la información en la zona cortical. Además, estos estudios evidencian la insuficiencia de los métodos experimentales utilizados para analizar el tratamiento de la información en esa área. Deben desarrollarse nuevos estudios y protocolos experimentales con el fin de revelar mejor la estructura de las representaciones motoras y verificar así este modelo de funcionamiento de los movimientos automatizados y planificados. Por ejemplo, la creación de un sistema que permita grabar los datos de una representación motora antes de que ésta sea manipulada o modificada por estímulos externos, facilitaría el análisis de los componentes espacio-temporales de la representación motora y permitiría describir la relación entre la acción representada y la acción ejecutada. La estimulación magnética transcraneal también evidenciaría las interacciones entre las representaciones motoras y la planificación de la secuencia de la acción.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jackson PL, Lafleur MF, Malouin F, Richards C, Doyon J. Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehabilitation. *Arch Phys Med Rehab* 2001; 82: 1133-41.
2. Solodkin A, Hlustik P, Chen EE, Small SL. Fine modulation in network activation during motor execution and motor imagery. *Cereb Cortex* 2004; 14: 1246-55.
3. Rossini PM, Rossi S, Pasqualetti P, Tecchio F. Corticospinal excitability modulation to hand muscles during movement imagery. *Cereb Cortex* 1999; 9: 161-7.
4. Fery YA. Differentiating visual and kinesthetic imagery in mental practice. *Can J Exp Psychol* 2003; 57: 1-10.
5. Decety J, Grèzes J. Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends Cogn Sci* 1999; 3: 172-8.
6. Crammond DJ. Motor imagery: never in your wildest dream. *Trends Neurosci* 1997; 20: 54-7.
7. Decety J. The neurophysiological basis of motor imagery. *Behav Brain Res* 1996; 77: 45-52.
8. Jeannerod M. The representing brain. Neural correlates of motor intention and imagery. *Behav Brain Sci* 1994; 17: 187-245.
9. Georgopoulos AP, Massey JT. Cognitive spatial-motor processes. 1. The making of movements at various angles from a stimulus direction. *Exp Brain Res* 1987; 65: 361-70.
10. Decety J, Jeannerod M, Parblanc C. The timing of mentally represented actions. *Behav Brain Res* 1989; 34: 35-42.
11. Jeannerod M. Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia* 1995; 33: 1419-32.
12. Decety J, Perani D, Jeannerod M, Bettinardi V, Tadary B, Woods R, et al. Mapping motor representation with positron emission tomography. *Nature* 1994; 371: 600-2.
13. Jeannerod M, Frak V. Mental imaging of motor activity in humans. *Curr Opin Neurobiol* 1999; 9: 735-9.
14. Gerardin E, Sirigu A, Lehericy S, Poline JB, Gaymard B, Marsault C, et al. Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cereb Cortex* 2000; 10: 1093-104.
15. Jeannerod M, Decety J. Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Curr Opin Neurobiol* 1995; 5: 727-32.
16. Sirigu A, Duhamel JR, Cohen L, Pillon B, Dubois B, Agid Y. The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science* 1996; 273: 1564-8.
17. Halsband U, Lange R. Motor learning in man: a review of functional and clinical studies. *J Physiol (Paris)* 2006; 99: 414-24.
18. Gerardin E, Lehericy S, Pochon JB, Tezenas du Montcel S, Mangin JF, Poupon F, et al. Foot, hand, face and eye representation in the human striatum. *Cereb Cortex* 2003; 13: 162-9.
19. Karni A, Meyer G, Rey-Hipólito C, Jezzard P, Adams MM, Turner R, et al. The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1998; 95: 861-8.
20. Penhune VB, Doyon J. Dynamic cortical and subcortical networks in learning and delayed recall of timed motor sequences. *J Neurosci* 2002; 22: 1397-406.
21. Toni I, Thoenissen D, Zilles K, Niedeggen M. Movement preparation and working memory: a behavioural dissociation. *Exp Brain Res* 2002; 142: 158-62.
22. Shin E, Fabiani M, Gratton G. Evidence of partial response activation in a memory-search task. *Cogn Brain Res* 2004; 20: 281-93.
23. Johnson SH, Rotte M, Grafton ST, Hinrichs H, Gazzaniga MS, Heinze HJ. Selective activation of a parietofrontal circuit during implicitly imagined prehension. *Neuroimage* 2002; 17: 1693-704.
24. Heath M, Westwood DA. Can a visual representation support the online control of memory-dependent reaching? Evident from a variable spatial mapping paradigm. *Motor Control* 2003; 7: 346-61.

25. Constantinidis C, Franowicz MN, Goldman-Rakic PS. The sensory nature of mnemonic representation in the primate prefrontal cortex. *Nat Neurosci* 2001; 4: 311-6.
26. D'Esposito M, Detre JA, Alsop DC, Shin RK, Atlas S, Grossman M. The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature* 1995; 378: 279-81.
27. Ranganath C, Johnson MK, D'Esposito M. Prefrontal activity associated with working memory and episodic long-term memory. *Neuropsychologia* 2003; 41: 378-89.
28. Tachibana Y, Nambu A, Hatanaka N, Miyachi S, Takada M. Input-output organization of the rostral part of the dorsal premotor cortex, with special reference to its corticostriatal projection. *Neurosci Res* 2004; 48: 45-57.
29. Gentilucci M, Castiello U, Corradini ML, Scarpa M, Umiltà C, Rizzolatti G. Influence of different types of grasping on the transport component of prehension movements. *Neuropsychologia* 1991; 29: 361-78.
30. Gentilucci M. Object motor representation and language. *Exp Brain Res* 2003; 153: 260-5.
31. Tucker M, Ellis R. The potentiation of grasp types during visual object categorization. *Visual Cogn* 2001; 8: 769-800.
32. Tucker M, Ellis R. Action priming by briefly presented objects. *Acta Psychol Amst* 2004; 116: 185-203.
33. Chao LL, Martin A. Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *Neuroimage* 2000; 12: 478-84.
34. Grezes J, Tucker M, Armony J, Ellis R, Passingham RE. Objects automatically potentiate action: an fMRI study of implicit processing. *Eur J Neurosci* 2003; 17: 2735-40.
35. Gentilucci M. Object motor representation and reaching-grasping control. *Neuropsychologia* 2002; 40: 1139-53.
36. Gerlach C, Law I, Paulson OB. When action turns into words. Activation of motor-based knowledge during categorization of manipulable objects. *J Cogn Neurosci* 2002; 14: 1230-9.
37. Jenkins IH, Brooks DJ, Nixon PD, Frackowiak RS, Passingham RE. Motor sequence learning: a study with positron emission tomography. *J Neurosci* 1994; 14: 3775-90.
38. Jueptner M, Stephan KM, Frith CD, Brooks DJ, Frackowiak RS, Passingham RE. Anatomy of motor learning. I. Frontal cortex and attention to action. *J Neurophysiol* 1997; 77: 1313-24.
39. Wu T, Kansaku K, Hallett M. How self-initiated memorized movements become automatic: a functional MRI study. *J Neurophysiol* 2004; 91: 1690-8.
40. Passingham RE. Attention to action. *Phil Trans R Soc Lond B* 1996; 351: 1473-9.
41. Jahanshahi M, Jenkins IH, Brown RG, Marsden CD, Passingham RE, Brooks DJ. Self-initiated versus externally triggered movements. I. An investigation using measurement of regional cerebral blood flow with PET and movement-related potentials in normal and Parkinson's disease subjects. *Brain* 1995; 118 (Pt 4): 913-33.
42. Jenkins IH, Jahanshahi M, Jueptner M, Passingham RE, Brooks DJ. Self-initiated versus externally triggered movements. II. The effect of movement predictability on regional cerebral blood flow. *Brain* 2000; 123 (Pt 6): 1216-28.
43. Goodale MA. Different spaces and different times for perception and action. *Prog Brain Res* 2001; 134: 313-31.
44. Goodale MA, Westwood DA. An evolving view of duplex vision: separate but interacting cortical pathways for perception and action. *Curr Opin Neurobiol* 2004; 14: 203-11.
45. Rushworth MF, Krams M, Passingham RE. The attentional role of the left parietal cortex: the distinct lateralization and localization of motor attention in the human brain. *J Cogn Neurosci* 2001; 13: 698-710.
46. Rushworth MF, Johansen-Berg H, Gobel SM, Devlin JT. The left parietal and premotor cortices: motor attention and selection. *Neuroimage* 2003; 20 (Suppl 1): S89-100.
47. Boussaoud D. The planning of action: can one separate attention from intention? *Med Sci (Paris)* 2003; 19: 583-91.
48. Sakagami M, Tsutsui K. The hierarchical organization of decision making in the primate prefrontal cortex. *Neurosci Res* 1999; 34: 79-89.
49. Deiber MP, Ibáñez V, Sadato N, Hallett M. Cerebral structures participating in motor preparation in humans: a positron emission tomography study. *J Neurophysiol* 1996; 75: 233-47.
50. Ridderinkhofa KR, Van den Wildenberg W, Segalowitzd SJ, Carter CS. Neurocognitive mechanisms of cognitive control: the role of prefrontal cortex in action selection, response inhibition, performance monitoring, and reward-based learning. *Brain Cogn* 2004; 56: 129-40.
51. Tanji J, Hoshi E. Behavioral planning in the prefrontal cortex. *Curr Opin Neurobiol* 2001; 11: 164-70.
52. Seitz RJ, Canavan AG, Yaguez L, Herzog H, Tellmann L, Knorr U et al. Representations of graphomotor trajectories in the human parietal cortex: evidence for controlled processing and automatic performance. *Eur J Neurosci* 1997; 9: 378-89.
53. Georgopoulos AP, Kalaska JF, Caminiti R, Massey JT. On the relations between the direction of two-dimensional arm movements and cell discharge in primate motor cortex. *J Neurosci* 1982; 2: 1527-37.
54. Jeannerod M, Arbib MA, Rizzolatti G, Sakata H. Grasping objects: the cortical mechanisms of visuomotor transformation. *Trends Neurosci* 1995; 18: 314-20.
55. Pochon JB, Levy R, Poline JB, Crozier S, Lehericy S, Pillon B, et al. The role of dorsolateral prefrontal cortex in the preparation of forthcoming actions: an fMRI study. *Cereb Cortex* 2001; 11: 260-6.
56. Debaere F, Wenderoth N, Sunaert S, Van Hecke P, Swinnen SP. Changes in brain activation during the acquisition of a new bimanual coordination task. *Neuropsychologia* 2004; 42: 855-67.
57. Obayashi S, Suhara T, Nagai Y, Okauchi T, Maeda J, Iriki A. Monkey brain areas underlying remote-controlled operation. *Eur J Neurosci* 2004; 19: 1397-407.
58. Fagg AH, Arbib MA. Modeling parietal-premotor interactions in primate control of grasping. *Neural Netw* 1998; 11: 1277-303.
59. Shen L, Alexander GE. Preferential representation of instructed target location versus limb trajectory in dorsal premotor area. *J Neurophysiol* 1997; 77: 1195-212.
60. Ochiai T, Mushiake H, Tanji J. Effects of image motion in the dorsal premotor cortex during planning of an arm movement. *J Neurophysiol* 2002; 88: 2167-71.
61. Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V. Motor and cognitive functions of the ventral premotor cortex. *Curr Opin Neurobiol* 2002; 12: 149-54.
62. Rowe J, Friston K, Frackowiak R, Passingham R. Attention to action: specific modulation of corticocortical interactions in humans. *Neuroimage* 2002; 17: 988-98.

COGNITIVE-MOTOR INTERACTIONS: THE ROLE OF MOTOR REPRESENTATION

Summary. Introduction. *In the last decade, studies in cognitive neuroscience have considerably furthered our knowledge about the interactions between cognition and action. In particular, motor representation is seen to be one of the cognitive processes involved in the production of movement. This motor representation was deduced from comparisons between cognitive (e.g. motor imagination) and motor processes (e.g. motor performance). Yet, the interactions between this representation and other cognitive-motor processes such as motor planning eclipse the importance of the function of motor representation in action. In addition, this situation often gives rise to confusion when it comes to interpreting the function of motor representation. Consequently, the exact role it plays in producing movement is not very clear. Development. In order to clarify this role, we analyse imagination, preparation, planning, motor performance, affordances and automated movements. At the same time, we also propose a hypothetical scheme of the functioning of motor representation during the execution of a movement and an action. Conclusions. Motor representation can be considered as an active component in certain cognitive-motor processes that enables motor response to be updated online, as well as allowing the optimisation and acquisition of new motor skills. [REV NEUROL 2008; 46: 219-24]*

Key words. Action. Affordances. Automated movement. Cognition. Motor planning. Motor representation.