

## CONTROLLO DEL MOVIMENTO

(da <http://www.univirtual.it/corsi/2003/schena/download/schena%20mod%2008%20OL.pdf>  
con adattamenti)

### INTRODUZIONE

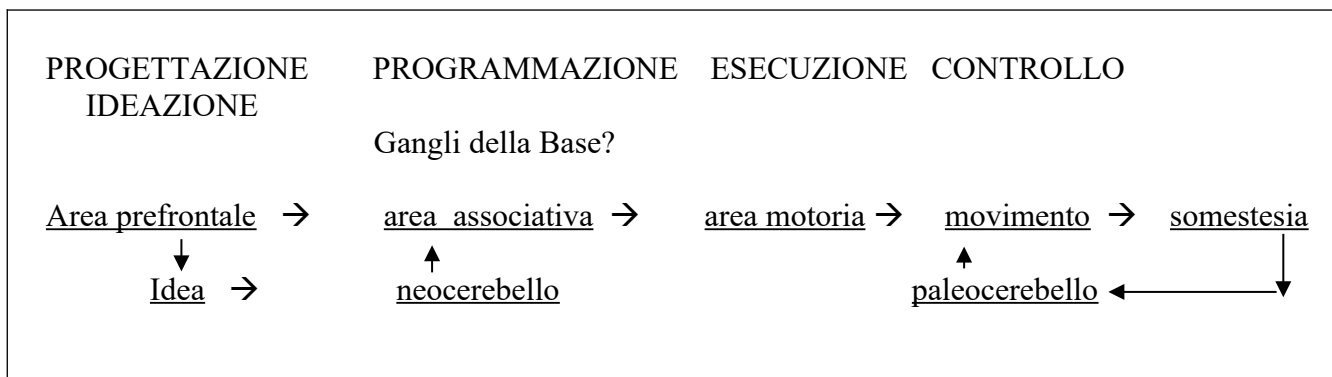
Quando parliamo semplicemente di movimento intendiamo perlopiù riferirci al movimento volontario o finalizzato, la forma più specifica ed anche più intrigante dell'azione umana. Lasciando ai filosofi della scienza decidere se l'agire umano può essere un'attività del tutto autonoma oppure se risulta in qualche modo sempre come risposta a stimoli esterni in questa lezione cercheremo di delineare le strutture e le modalità attraverso le quali il movimento si attua. In larga misura presenteremo dati e teorie ancora incompleti perché nonostante i grandi passi compiuti dalla scienza neurobiologica ancora troppi aspetti non sono chiari oppure non sono stati dimostrati in modo inequivocabile. Nonostante ciò che ancora non conosciamo, quanto sarà descritto nei prossimi paragrafi ci consentirà di avere una visione d'insieme del controllo motorio del movimento volontario e di come questo si possa integrare con le forme di movimento già descritte in precedenza.

### IL CONTROLLO DEL MOVIMENTO VOLONTARIO

Un movimento volontario è un'azione che viene realizzata per raggiungere un fine. Esso è il risultato di una serie d'attività nervose che possiamo in modo schematico raggruppare in diverse fasi, tra esse, tralasciando a) la determinazione dell'intenzione e poi b) l'ideazione o progettazione delle finalità dell'atto, sono evidenti: c) quella della decisione sulle modalità con cui raggiungere l'obiettivo (fase strategica o di programmazione) e d) il comando di compiere l'atto già programmato (fase tattica o di esecuzione). I dati sperimentali indicano che queste due fasi hanno origine in diverse zone della corteccia cerebrale. Il semplice movimento di un dito di una mano evoca, prima che sia evidenziabile alcun spostamento del dito, un'attivazione nelle aree parietali che si esaurisce mentre si osserva una attivazione della corteccia frontale (nella zona pre-rolandica, area 4) dal lato opposto del dito dove si verifica il movimento, ed avviene la contrazione muscolare.

Su queste basi è stato proposto che la definizione degli obiettivi sia di pertinenza delle aree associative della corteccia parietale mentre la fase tattica coinvolga la corteccia motrice. Questa ipotesi è anche confermata dalle limitazioni funzionali che si possono rilevare come conseguenza di danni ischemici delle diverse zone corticali. Uno schema più articolato del controllo motorio coinvolge anche altre aree cerebrali, di cui parleremo in seguito, e può essere proposto secondo la seguente articolazione che prevede un possibile intervento anche dei gangli della base e del cervelletto.

Schema 1. La struttura e l'organizzazione del controllo del movimento volontario.



L'area associativa, che riceve ed integra diverse informazioni sensoriali, produce la scelta dell'obiettivo da raggiungere sulla base della posizione del corpo, dell'oggetto da raggiungere

(prendere, sollevare, colpire,...) e della situazione ambientale. Gli stimoli potrebbero giungere all'area motrice direttamente o per il tramite d'altre strutture sottocorticali (neocerebello e gangli della base) nelle quali possono essere presenti dei programmi motori selezionabili ed adeguati per la finalità prescelta che trasferirebbero all'area motoria la sequenza corretta d'attivazioni neuronali. Se l'azione non è troppo veloce è possibile controllare l'esecuzione del movimento durante la sua attuazione sia attraverso i recettori sensitivi (a livello spinale, che al livello cerebellare e corticale), sia attraverso i recettori sensoriali mediante il confronto tra il movimento programmato (intenzione) e il movimento eseguito (azione).

In questo schema deve essere inserita anche l'adattamento della componente posturale, poichè ogni movimento incide sull'equilibrio generale del corpo e necessita quindi di una correzione riflessa vestibolare e cerebellare. Se poi il movimento è ripetuto, si osserva una progressiva anticipazione degli aggiustamenti posturali che tendono a precedere il movimento fino a minimizzare (o annullare) ogni variazione d'equilibrio (integrazione posturo-cinetica). Questi aggiustamenti sono realizzati in modo inconsapevole e si possono evidenziare solo analizzando con cura tutte le fasi di un movimento, ad esempio, con un sistema cinematografico.

### AREE MOTORIE CORTICALI E STRUTTURA SOMATOTOPICA

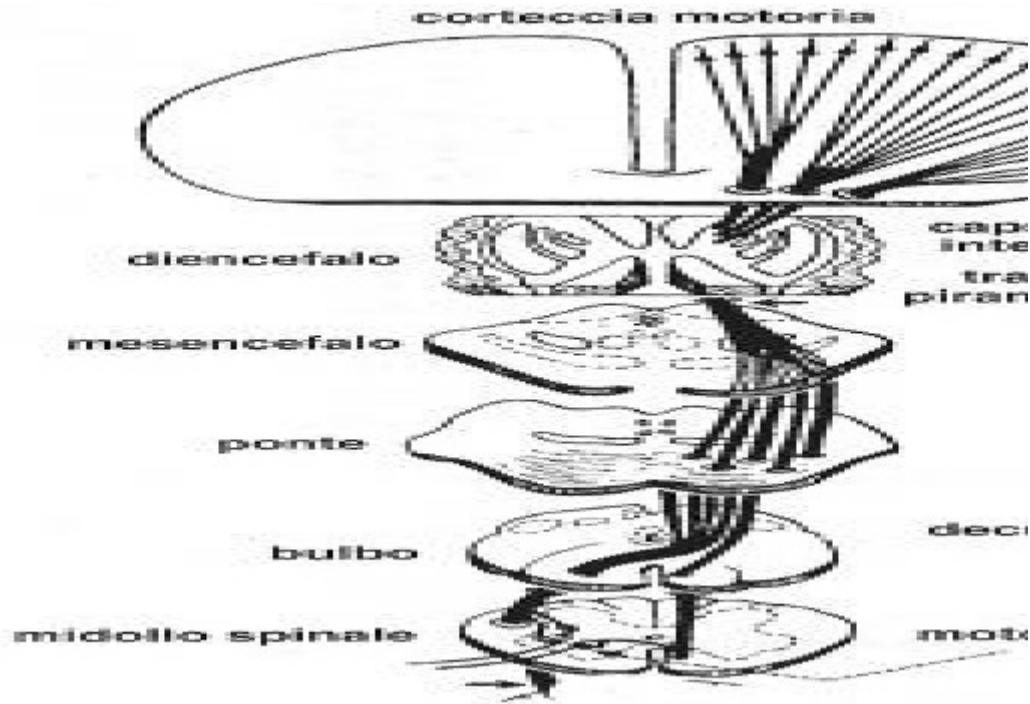
L'eccitabilità elettrica della corteccia cerebrale è stata scoperta verso la fine del IX secolo e all'inizio del '900 consentì a Brodmann, in modo abbastanza preciso, la collocazione topografica delle principali attività cerebrali nella scimmia. La stimolazione di una zona estesa nella corteccia frontale, anteriormente al solco centrale (scissura di Rolando) provocava movimenti all'emisoma controlaterale; nella suddivisione proposta da Brodmann questa zona fu definita area 4 o area motrice primaria (vedi figura parte A). Successivamente, verso la metà del secolo, Penfield ottenne le stesse informazioni nell'uomo stimolando la corteccia di pazienti nel corso di interventi di neurochirurgia (figura parte B).



**Figura 26.4 – A) Effetti motori ottenuti stimolando la corteccia di una scimmia; B) Localizzazione dell'area motrice primaria nell'uomo.**

In questo modo fu possibile identificare una precisa rappresentazione della motricità delle varie zone del corpo nella corteccia (homunculus motorio) e dimostrare che zone del corpo vicine sono contigue anche sulla corteccia (somatotopia motoria) anche se le varie parti del corpo sono rappresentate capovolte in senso verticale. La superficie attribuibile alle varie parti del corpo non risulta proporzionale alle dimensioni ma piuttosto alle possibilità di movimento, ad esempio mani,

labbra e lingua coprono una zona molto più ampia della coscia o del tronco (vedi figura). Questi dati sperimentali riferiti a persone in anestesia sono stati successivamente confermati anche con altre tecniche in condizioni di veglia (ad esempio con la stimolazione magnetica transcranica). Queste aree corticali ricevono anche molte afferenze in particolare dal talamo e da altre zone della corteccia cerebrale.



La stimolazione corticale ha permesso di osservare che anche aree anteriori all'area motrice primaria provocano movimenti seppure in modo più complesso e richiedendo maggiore intensità di stimolazione. Si riconosce un'area premotoria la cui attivazione provoca la contrazione di più gruppi muscolari, specialmente assiali dell'arto superiore, ed un'area motoria supplementare con maggiore effetto sul movimento sincrono dell'arto superiore nelle sue porzioni distali d'entrambi i due lati del corpo. Vi sono inoltre altre aree dell'encefalo che provocano movimenti (il nucleo rosso, i collicoli superiori, i nuclei vestibolari, la formazione reticolare). Le varie aree danno origine a fibre discendenti che si portano al midollo spinale per stimolare i motoneuroni, ma anche per esercitare una forte regolazione su interneuroni che mediano le attività autonome del midollo e le afferenze sensoriali (si rammenti quanto detto a suo tempo a proposito dei riflessi mediati dai fusi neuromuscolari e dai circuiti spinali).

## I SISTEMI DISCENDENTI

La maggior parte delle fibre discendenti dalla corteccia verso il midollo origina dalle cellule piramidali presenti negli strati 3 e 5 della corteccia. In particolare le grandi cellule dello strato 5 formano il sistema di fibre noto come piramidi bulbari che connettono le aree motorie con i motoneuroni del midollo responsabili dell'attivazione dei muscoli. La dimensione delle fibre e l'assenza (o il ridotto numero) di sinapsi permette la rapidità di esecuzione del gesto motorio. Tuttavia una quota non piccola di fibre entra in contatto con interneuroni o si ferma a livello bulbare generando vie polisynaptiche implicate nei fenomeni di controllo delle afferenze e di modulazione del movimento. Il percorso delle fibre presenta un incrocio a livello di bulbo (decussazione delle piramidi) che spiega la ragione dell'opposizione tra lato d'attivazione corticale e lato d'esecuzione del movimento (vedi figura precedente).

Esistono altre connessioni, che in parte abbiamo già citato, tra l'encefalo ed il midollo ( vedi figura) la cui funzione non è ancora molto ben definita e che spesso sono raggruppate con il termine di sistema extrapiramidale. Il funzionamento delle cellule piramidali è stato studiato approfonditamente per comprendere le modalità con cui viene controllato il movimento. È stato osservato che i movimenti semplici sono a carico di piccole serie di neuroni, disposti in colonne, che presentano una attività ottimale che è dipendente dalla direzione verso la quale si vuole svolgere un movimento. La forza del movimento eseguito è la risultante della sommatoria delle attivazioni di tutti i neuroni che sono implicati in quella direzione e viene modulata dai segnali afferenti che provengono dai recettori cutanei e propriocettivi degli arti coinvolti e che si connettono direttamente con i neuroni piramidali. Le aree premotorie e supplementare si attivano solo per movimenti complessi (ad esempio l'uso coordinato di due mani), precedendo in genere l'attivazione dell'area primaria, per questo è stato anche suggerito che siano coinvolti anche nell'integrazione posturocinetica.

## LE AREE PREMOTORIE E LA PROGRAMMAZIONE MOTORIA

Gli studi neurofisiologici più recenti hanno potuto chiarire in modo abbastanza preciso quale sia la relazione tra l'eccitazione di singole zone cerebrali e l'esecuzione di movimenti singoli o brevi sequenze di atti motori, ma non hanno potuto dirimere in maniera soddisfacente le modalità attraverso le quali si può passare dall'idea di compiere un gesto all'attivazione corretta di tutti i motoneuroni necessari per lo scopo. In altri termini vi sono ancora molte lacune per ciò che riguarda la conoscenza della fase di progettazione dell'intenzione e dell'idea e del passaggio alla fase di programmazione motoria. La maggior parte dei dati a disposizione sono stati acquisiti in esperimenti su scimmie e solo negli ultimi anni è stato possibile avere dei dati sull'uomo con le moderne tecniche di imaging (risonanza magnetica cerebrale).

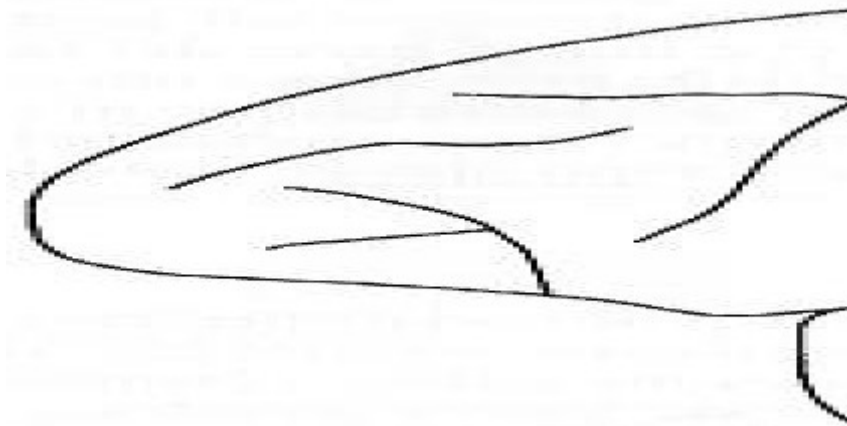
Esperimenti con animali addestrati a rispondere a compiti complessi hanno permesso di evidenziare che nella fase di preparazione di un gesto (quando è chiaro lo scopo, ma ancora si deve definire quale azione produrre) si attivano i neuroni dell'area premotoria (area 6) e che tale attivazione avviene, anche se poi il gesto non viene compiuto, allo scopo di coordinare l'intervento muscolare che agisce su più articolazioni assiali o prossimali del lato contrario. È stato inoltre visto che anche l'area motoria supplementare si attiva in anticipo, determinando il coordinamento muscolare che agisce su più articolazioni distali d'entrambi i lati del corpo e che tale attivazione è specifica per il tipo di sequenza di movimenti richiesti (es. allunga la zampa, tira una maniglia e girala).

Recenti studi sull'uomo hanno dimostrato che l'attività dei neuroni dell'area motrice supplementare è in rapporto con l'attività mentale correlata con la programmazione di movimenti complessi bilaterali come la rotazione del corpo o una sequenza complessa d'aperture e chiusure delle dita delle mani, sia quando il movimento è effettivamente eseguito, sia quando è solo pensato. L'esistenza di cospicue afferente dalla corteccia parietale posteriore alle aree premotorie, infine, suggerisce che queste aree potrebbero prendere parte al controllo dei movimenti guidati da segnali visivi o somatosensitivi. Da qui parte oggi la funzione dei neuroni specchio di Rizzolatti.

## ATTIVITÀ INTEGRATIVA CORTICALE (TRASFORMAZIONI VISUOMOTORIE)

Da quanto è stato detto finora appare evidente come la programmazione dei movimenti non possa prescindere dall'analisi dell'informazione sensoriale ed in particolare di quella visiva che fornisce sia le informazioni specifiche sull'andamento del gesto che quelle di "contesto", che costituiscono entrambe la modalità più comuni di controllo retroattivo del gesto motorio, sfruttando in larga misura modalità di elaborazione in parallelo. Negli anni 80 alcuni autori suggerirono che le informazioni di pertinenza motoria presenti nell'area visiva primaria (area 17) fossero veicolate attraverso una fascio ventrale verso la corteccia temporale e per un fascio dorsale all'area parietale posteriore, definendo rispettivamente queste connessioni "via del cosa" e "via del dove". Queste denominazioni si riferiscono all'ipotesi che la sede temporale fosse responsabile della definizione

qualitativa degli oggetti, mentre la zona parietale si occupasse della loro collocazione contestuale. Inoltre in quest'ultima area si trovano anche i neuroni che contribuiscono all'indicazione della strategia motoria da mettere in atto per il raggiungimento della finalità identificata, codificando le corrette stimolazioni per i centri motori primari e può quindi essere assimilata anche ad una via del come.



COSA e DOVE/COME sono gli elementi essenziali di cui deve essere a conoscenza il sistema nervoso per poter organizzare un movimento finalizzato. Essi vengono trasferiti alle aree operative attraverso tre circuiti parieto-frontali che sono stati identificati mediante lo studio di attività correlate di visione e movimento. Il primo circuito è relativo al controllo dei movimenti oculari e corrisponde all'area 8 di Brodmann (Frontal Eye Field); il secondo circuito controlla l'esecuzione di movimenti mirati a raggiungere punti precisi nello spazio (area 7b); il terzo circuito è deputato all'organizzazione dei movimenti di prensione di oggetti con la mano (area anteriore del solco Parietale) e codifica specificamente i tipi di prensione. La stretta interazione visuo-motoria di queste aree è dimostrata dal fatto che questi neuroni si attivano anche solo nella fase di osservazione degli oggetti seppure questa non sia seguita da alcuna azione di prensione.

L'ipotesi formulata è che esista una specie di "vocabolario" di trasformazioni visuo-motorie che è sensibile alla vista, rappresentando una sorta di atto motorio potenziale e può essere liberato dalla decisione di compiere il movimento che dipende da sia fattori esterni che da stati interni (ad esempio stati emotivi). Il processo dovrebbe procedere a due stadi. Il primo stadio è costituito dalla creazione di una serie di comandi generali che riguardano azioni finalizzate (molti dei quali presenti fin dalla nascita): prendere, spingere, portare alla bocca, gettare.... Il secondo stadio è dato dall'esecuzione ovvero dall'attivazione dei sinergismi corticali e midollari necessari per la realizzazione dell'azione che richiedono l'eccitazione d'aree motorie frontali (area 4) in modo selettivo per ogni azione. In questo modo non si dovrà pensare alla sequenza base dell'azione ma solo al suo controllo ed eventualmente alla sua correzione.

Quanto detto finora e le evidenze funzionali rendono chiara l'importanza delle relazioni tra sistemi percettivi e sistemi motori e definiscono l'ambito di interazione percezione-azione sul quale torneremo. Infine si deve sottolineare l'importanza delle connessioni visuo-motorie nei fenomeni di apprendimento motorio, spesso si imparano nuovi gesti attraverso vari tentativi di riproduzione di movimenti visti eseguire da altri. È stato dimostrato che alcuni neuroni dell'area 6 si attivano specificamente tramite la visione di movimenti compiuti da altri soggetti, a patto che i movimenti siano in una certa misura già "conosciuti", questo meccanismo servirebbe, cioè, per affinare un gesto e non per impararlo ex novo.