

Associare i movimenti: chi fissa le regole del gioco?

di Fausto Baldissera

fausto.baldissera@unimi.it

Mandare al contrario le mani e i piedi: non sempre un gioco da ragazzi

La storia di cui riferirò è un esempio di come la ricerca neurofisiologica possa originare dalle osservazioni sul campo e meditazioni e dalle riflessioni di un fisiatra. Circa venti anni fa, attraverso gli allora miei allievi Luigi Tesio e Federica Dvorzak, conobbi presso l'Istituto Neurologico Carlo Besta di Milano Pietro Civaschi. Egli era un fisiatra estremamente curioso su quanto la sua professione gli portava sotto gli occhi e mi chiese se sapessi spiegargli certi strani comportamenti motori che sui libri venivano interpretati in maniera poco convincente se non addirittura ignorati. Uno degli aspetti che più lo avevano stimolato era il legame, nascosto ma potente, fra i movimenti che sono di assoluta facilità se vengono

compiuti singolarmente ma che diventano difficili quando vengono associati fra loro. Il prototipo di questi movimenti "associati" o "accoppiati" è quel gioco che tutti ci siamo sentiti proporre da bambini: tracciare con le mani cerchi disposti sul piano sagittale. È semplice fare un movimento rotatorio con una mano per volta, sia in un verso senso che nell'altro. Ed è facile anche muovere le due mani insieme, a condizione che i movimenti siano speculari, isodirezionali. Invece è molto difficile far ruotare le mani in senso contrario l'una rispetto all'altra. Nel passato questo strano comportamento aveva attirato l'attenzione di alcuni luminari¹⁻³, dal fisiologo Johannes Muller (1840) ai neurologi Meige (1901) e Noica (1912), ma sembrava che da allora nessun altro si fosse interessato alla questione. Ne sapevo qualcosa? mi chiese il fisiatra. Io non seppi come rispondere se non proponendogli di condurre insieme un'analisi più approfondita dei movimenti associati. Anche per altre coppie di movimenti tra gli arti dello stesso lato (per esempio la flessio-

estensione della mano e del piede sul piano parasagittale, oppure la loro rotazione assiale) o coppie di movimenti all'interno dello stesso arto (la flessio-estensione ritmica e simultanea di polso e gomito) non vi è nessuna difficoltà nell'associare i movimenti che hanno la stessa direzione angolare (ovvero sono "in fase") mentre è difficile o impossibile muovere i due segmenti in opposizione di fase: basta diminuire un poco l'attenzione oppure accelerare il ritmo dei movimenti e si cade irreversibilmente nell'associazione isodirezionale.

Per iniziare scegliemmo l'associazione omolaterale tra le flessio-estensioni di mano e piede (alla quale sono rimasto finora affezionato) sia perché offriva maggiori comodità di registrazione strumentale del movimento e dell'attività muscolare, sia perché testimoniava meglio di altre che la facilità dell'accoppiamento è legata alla direzione del movimento e non ai muscoli impiegati per compierlo. Infatti l'accoppiamento isodirezionale rimane quello preferito quando la mano è sia prona sia supina

malgrado che, dopo il passaggio dall'una all'altra posizione, si richieda la co-attivazione di muscoli che prima erano antagonisti⁴. Un primo passo è stato quello di valutare la "forza" relativa delle associazioni facile e difficile misurando per quanto tempo sia possibile mantenere senza errori ciascuna di esse. Mentre i movimenti isodirezionali si possono continuare, anche a frequenze elevate, fino al sopraggiungere della fatica, la durata sostenibile dei movimenti anti-fase diminuisce progressivamente al crescere della frequenza di esecuzione. Alcune persone riescono a prolungare l'esercizio per 10 secondi soltanto se il ritmo è inferiore a 1,4 cicli al secondo, molti arrivano fino a 2 ma pochi raggiungono 2,5 cicli al secondo. Se si tenta un ritmo di 3 cicli al secondo, la massima parte dei soggetti non riesce nemmeno a cominciare l'esercizio e precipita immediatamente nel movimento in fase.

Alla ricerca di regole meccaniche e nervose

L'aumento delle conoscenze di biomeccanica e di neurofisiologia e il progresso nei mezzi di indagine hanno permesso di compiere alcuni passi significativi verso la comprensione dei meccanismi che regolano l'associazione fra movimenti. Una volta delineata l'intrinseca diversità fra i due tipi di accoppiamento (quello "facile-in fase" e quello "difficile-in antifase") l'obiettivo successivo fu quello di distinguere se e in che misura la differenza fosse dovuta all'influenza di fattori biomeccanici piuttosto che a fattori legati al controllo nervoso dei due tipi di associazione.

Da un punto di vista teorico il modo più semplice di muovere simultaneamente due arti è quello di inviare a entrambi uno stesso comando motore. Nel caso delle oscillazioni ritmiche della mano e del piede si tratterebbe di un comando di forma all'incirca sinusoidale inviato dalla corteccia motoria ai rigonfiamenti cervicale e lombare del midollo e distribuito infine ai motoneuroni. Va subito detto che un meccanismo così semplice funzionerebbe soltanto se i due segmenti avessero identiche proprietà meccaniche (come non è per mano e piede). Altrimenti al crescere della frequenza delle oscillazioni il segmento relativamente più "pesante" (quello, cioè, che subisce in maggior misura gli effetti dell'inerzia) rimarrebbe progressivamente indietro rispetto all'altro. Per mantenere il sincronismo dei due segmenti sotto un unico comando, si rende dunque necessaria l'assistenza da parte di un meccanismo di controllo che avverta e corregga l'eventuale sfasamento tra i due.

In base a queste considerazioni si è cominciato con il verificare se, all'aumentare del ritmo dei movimenti, i rapporti di fase tra mano e piede rimangono invariati oppure se uno dei due segmenti ritarda⁵. Se sono ciclici (ovvero si ripetono periodicamente sempre uguali) i rapporti di fase fra eventi diversi si possono misurare in gradi angolari. Basta considerare che un ciclo di movimento (per esempio andata e ritorno dalla posizione di massima flessione) copre 360° (la sola andata, da massima flessione a massima estensione, ne copre 180°, ecc.). L'inizio di un ciclo è definibile arbitrariamente. Per esempio si può scegliere di definire "0°" la posizione di massima flessione della mano. Se in quell'istante il piede si trova in massima flessione dorsale si potrà dire che il piede è "sfasato" di 180° rispetto alla mano, ecc. Lo stesso discorso vale per eventi ciclici di tipo elettrico (come l'elettromiografia di superficie-EMG dei muscoli coinvolti in questi movimenti) e anche per i rapporti di fase fra eventi ciclici meccanici (posizione angolare) ed elettrici (EMG). La Fig. 1 mostra i movimenti oscillatori isodirezionali di mano e piede insieme all'attività elettromiografica EMG di superficie dei muscoli estensori dorsali delle due estremità (Extensor Carpi Radialis, ECR e Tibialis Anterior, TA), a due

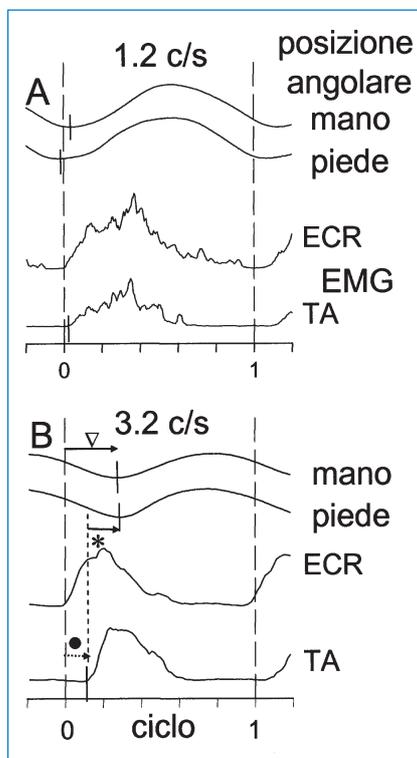


Fig. 1 - All'aumentare della frequenza delle oscillazioni appaiate di mano e piede da 1,2 a 3,2 cicli al secondo, il sincronismo tra i movimenti si mantiene malgrado le differenti proprietà meccaniche di mano e piede. Alla frequenza più alta, alla quale è più grande l'effetto dell'inerzia, il maggior ritardo meccanico della mano è compensato dall'anticipo nell'attivazione dell'estensore della mano (ECR) rispetto all'estensore del piede (TA).

frequenze di esecuzione. Le oscillazioni della mano e del piede sono in fase tra loro sia alla frequenza più bassa sia alla frequenza più alta, mentre la fase delle attivazioni muscolari cambia con la frequenza. Infatti, mentre a 1.2 cicli al secondo l'inizio dell'EMG nell'ECR e nel TA è simultaneo, a 3.2 cicli/s l'ECR precede il TA di circa 50° (freccia ● nella Fig. 1).

Si può anche osservare che, salendo a 3.2 cicli/s, cresce il ritardo di fase tra l'inizio dell'attività EMG e l'inizio del relativo movimento e che questo effetto è più grande per la mano (circa 110°, freccia ∇ nella Fig. 1) che per il piede (freccia *). Questo semplice esperimento illumina due aspetti essenziali. In primo luogo la più cospicua perdita di fase della mano al crescere della frequenza di esecuzione (freccia ∇ rispetto a freccia*) indica che la resistenza inerziale influenza il movimento della mano in maggior misura che il movimento del piede. In secondo luogo il fatto che, ciò malgrado, i rapporti di fase tra i due movimenti rimangano invariati alle due frequenze di esecuzione mette in evidenza l'intervento di un meccanismo di controllo nervoso, il quale anticipa di circa 50° l'attivazione dei muscoli che muovono la mano rispetto a quelli che muovono il piede e previene, in questo modo, la perdita di fase di origine meccanica della mano dovuta a cause meccaniche. Il grafico della Fig. 2 mette in evidenza come i rapporti di fase tra i due movimenti si mantengano pressoché costanti alle diverse frequenze, con la

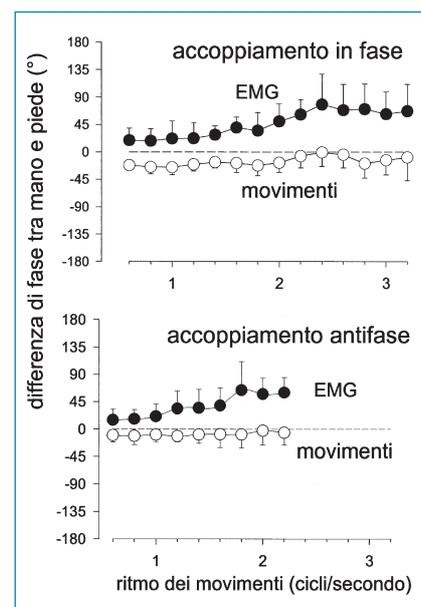


Fig. 2 - I grafici mostrano la differenza di fase tra le oscillazioni di mano e piede (cerchi vuoti) alle varie frequenze di esecuzione. Si noti come la mano abbia un ritardo lieve, ma pressoché costante rispetto al piede nell'accoppiamento in fase mentre il sincronismo è migliore nell'accoppiamento antifase. I cerchi pieni indicano il ritardo di fase tra l'attivazione del TA e dell'ECR. Si noti come al crescere del ritmo di esecuzione l'anticipo dell'ECR incrementa progressivamente.

mano che si mantiene in lieve ritardo di fase rispetto al piede. Nello stesso grafico si mostra anche che, al crescere della frequenza, si incrementa progressivamente l'anticipo della contrazione dell'ECR rispetto al TA, che compensa gli effetti ritardanti della resistenza inerziale della mano. Il controllo nervoso promuove un anticipo ancora più potente durante i movimenti in antifase e riesce a mantenere un sincronismo quasi perfetto tra le escursioni articolari. Il controllo nervoso interviene anche quando a un segmento venga applicato un carico esterno che ne modifichi le proprietà meccaniche⁶. Per esempio (Fig. 3, grafici superiori) che cosa succede se si applica alla mano una massa rotante (un vero e proprio volano)? Il volano, aumentando fortemente la resistenza inerziale della mano, ne accentua la diversità, in quanto corpo meccanico in movimento, dal piede e stimola quindi un ulteriore anticipo nell'attivazione muscolare dell'ECR sul TA. Il compenso tuttavia non è completo e ne risulta un progressivo ritardo della mano rispetto al piede al crescere della frequenza. Effetti opposti produce l'applicazione di un carico elastico (Fig. 3, grafici inferiori) il quale, contrastando l'inerzia propria della mano, avvicina tra loro le proprietà meccaniche di mano e piede che ora rispondono a comandi nervosi simultanei con movimenti ben sincronizzati.

Il controllo nervoso delle associazioni iso-direzionali: un dialogo tra gli arti oppure la disciplinata obbedienza a un comando comune?

Una volta stabilita l'esistenza di un controllo nervoso che interviene per mantenere i rapporti di fase tra segmenti con caratteristiche meccaniche diverse, si apre la questione di come esso agisca. Poiché il controllo deve trovare alimento dalle afferenze cinestetiche, che segnalano l'effetto dei carichi sulla posizione degli arti, si può immaginare un'organizzazione motoria come quella semplificata nella Fig. 4, (schema di sinistra). Un comando centrale inviato in parallelo ai due segmenti impone il movimento iso-ritmico; poi le afferenze cinestetiche indotte dal movimento di ciascun arto sono inviate attraverso un "controllore di fase" alle vie motorie che muovono l'altro arto (nella figura è schematizzata soltanto la via tra arto inferiore e arto superiore) per anticipare o ritardare l'attivazione muscolare in modo da riportare in fase i due movimenti quando essi dovessero sfasarsi.

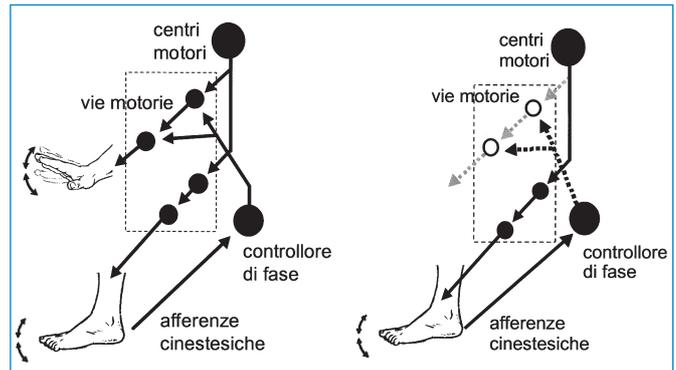


Fig. 4 - Schema interpretativo dei meccanismi di accoppiamento mano-piede. A sinistra si ipotizza che oltre al comando centrale inviato simultaneamente a muovere la mano e il piede, le afferenze cinestetiche generate da un arto in movimento (qui si considerano soltanto quelle dal piede) agiscono sulle vie motorie dirette all'altro arto, "trascinandolo" in sincronismo. A destra si ipotizza che tali afferenze agiscano anche quando uno soltanto degli arti si muove, modulando sottilmente l'eccitabilità della via motoria diretta all'altro arto.

Se si ritiene questo schema verosimile, si può immaginare (Fig. 4, schema di destra) che le afferenze cinestetiche da un arto vengano attivate anche quando l'arto si muove da solo e che possano influenzare (in maniera sottilmente) l'eccitabilità della via motoria diretta al secondo arto anche quando esso venga mantenuto in riposo. Queste considerazioni hanno guidato la successiva sperimentazione, che è consistita nell'esplorare se l'eccitabilità dei motoneuroni dei muscoli flessori ed estensori dell'avambraccio, tenuto rilassato, viene modificata durante i movimenti di flesso-estensione del piede omolaterale. Gli esperimenti hanno dato risposta positiva. Durante i movimenti ciclici del piede, le risposte motorie nei muscoli Flexor Carpi Radialis

(FCR) ed Extensor Carpi Radialis ECR (riflesso H e potenziali evocati dalla stimolazione magnetica transcranica) vengono modulate sinusoidalmente (Fig. 5) al ritmo delle oscillazioni del piede⁷. A mano prona l'eccitabilità cresce nel Flessore del Carpo durante la fase di flessione plantare e diminuisce durante l'estensione dorsale del piede. L'opposto avviene per l'ECR (Fig. 6). Si può quindi arguire che se la modulazione divenisse sopraliminare la mano tenderebbe a muoversi in fase con il piede. A mano supi-

na lo schema della facilitazione si inverte: l'FCR, che ora solleva l'avambraccio verso l'alto, è facilitato durante la flessione dorsale del piede (Fig. 6). Di nuovo, dunque, se questi effetti divenissero sopraliminari, la mano tenderebbe a muoversi nella stessa direzione del piede, anche se ora sono attivati simultaneamente due muscoli (FCR e TA) che prima si contraevano in alternanza.

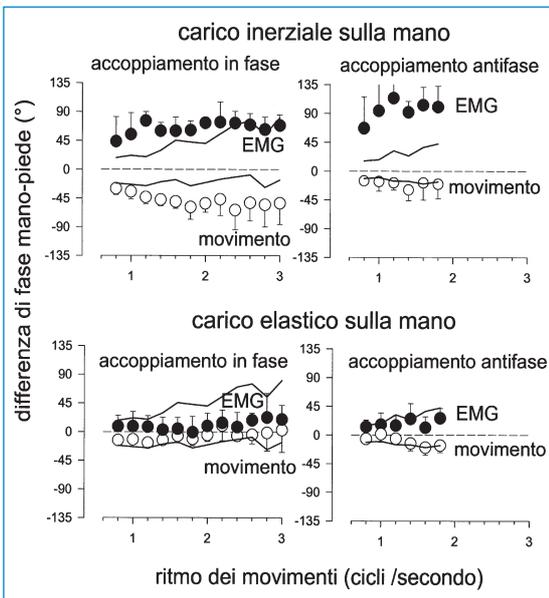


Fig. 3 - L'applicazione alla mano di un carico inerziale o elastico modifica le relazioni di fase mano-piede come risulta dal confronto tra le curve disegnate dai simboli (pieni e vuoti) e le linee azzurre, che riproducono le curve ottenute negli stessi soggetti in assenza di carico. Si noti come, nell'accoppiamento in fase, il carico inerziale incrementa il ritardo del movimento della mano e, simultaneamente, l'anticipo della sua attivazione muscolare. Nell'accoppiamento antifase un anticipo ancora maggiore nell'attivazione dell'ECR riesce a mantenere il movimento della mano in stretto rapporto di fase con quello del piede, compensando completamente l'azione ritardante del carico (cerchi vuoti sovrapposti alla linea). L'applicazione di un carico elastico produce gli effetti opposti a quelli indotti dal carico inerziale. I movimenti mantengono il sincronismo in entrambi gli accoppiamenti senza bisogno di anticipare l'attivazione dei muscoli della mano.

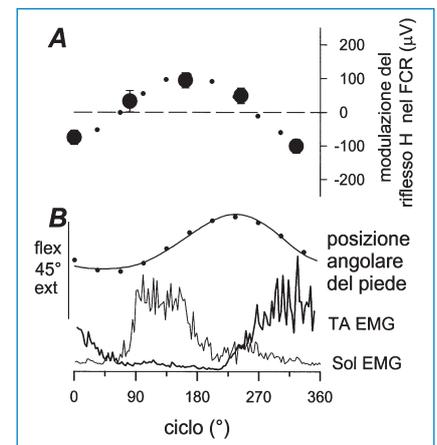


Fig. 5 - Con l'avambraccio rilassato e la mano prona, l'eccitabilità del riflesso H del muscolo Flessore Radiale del Carpo (FCR) viene modulata sinusoidalmente (A) durante l'oscillazione volontaria del piede. In B sono mostrati il movimento sinusoidale del piede e l'attivazione EMG dei muscoli Soleo e Tibiale Anteriore. Il riflesso aumenta durante la contrazione del Soleo e diminuisce durante l'attivazione del Tibiale Anteriore. Se la variazione di eccitabilità divenisse sopraliminare, la mano si muoverebbe nella stessa direzione del piede.

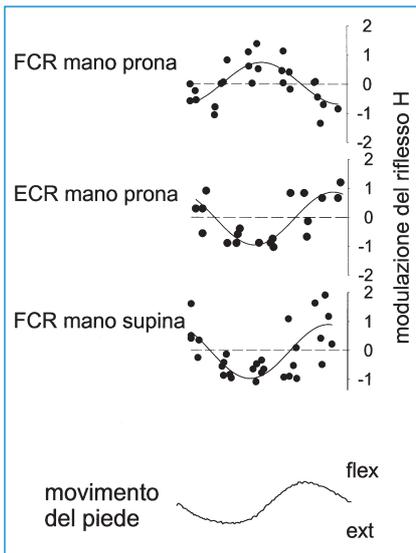


Fig. 6 - A mano prona, le variazioni di eccitabilità del riflesso H nel muscolo FCR durante i movimenti del piede sono accompagnate da variazioni speculari dell'eccitabilità riflessa nel muscolo antagonista, l'estensore radiale del Carpo (ECR). Se la mano viene portata in supinazione, l'eccitabilità dell'FRC si modifica in opposizione di fase rispetto a quanto accadeva a mano prona. Anche in questo caso, se le variazioni di eccitabilità raggiungessero livelli sopraliminari, la mano si muoverebbe nella stessa direzione del piede.

L'ipotesi di partenza sembrava quindi confermata: i movimenti del piede sono accompagnati da variazioni di eccitabilità delle vie motorie che innervano la mano, modulate nel tempo in modo tale che, qualora i due segmenti fossero mossi in associazione, tenderebbero a "trascinare" la mano nella stessa direzione angolare in cui si muove il piede. Diventa allora comprensibile anche perché sia difficile muovere i due segmenti in opposizione di fase: questo richiederebbe che intenzionalmente si vincano le influenze accoppianti che gli arti si "scambiano" reciprocamente quando si muovono. Dagli esperimenti, tuttavia, sono però venute anche altre indicazioni. Per esempio se si applica al piede un carico inerziale che aumenta il ritardo tra il movimento e l'attivazione muscolare la modulazione di eccitabilità nei muscoli dell'avambraccio rimane ancorata temporalmente all'attivazione muscolare e non al movimento del piede⁸. Di conseguenza è poco probabile che questa modulazione origini dalle afferenze cinestetiche generate dal movimento mentre è più verosimile che essa derivi da un'influenza subliminare, inviata dall'area corticale della mano al rigonfiamento midollare cervicale in parallelo al comando esplicito che dall'area corticale del piede ne attiva il movimento. Sostiene l'origine centrale della modulazione anche il fatto che essa scompare⁷ durante i brevi periodi (50-100 ms) in cui la corteccia motoria rimane inibita dopo una stimolazione magnetica transcranica ("periodo silente"). Non sono quindi gli arti che

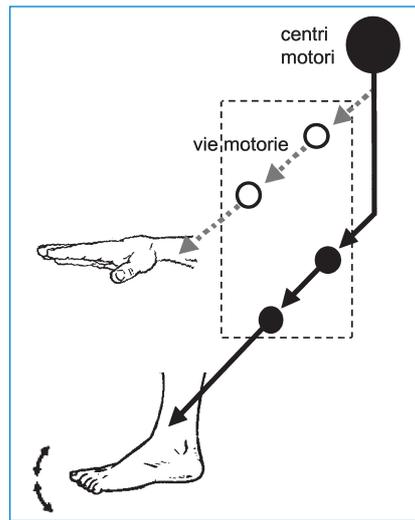


Fig. 7 - Durante il movimento oscillatorio del piede, le vie motorie dirette alla mano vengono attivate simultaneamente in modo sottoliminare. Non vi è rapporto tra tale attività e la posizione del piede, monitorata dalle afferenze cinestetiche.

si scambiano informazioni attraverso le afferenze cinestetiche, ma sono piuttosto le corteccie motorie relative a ciascuna estremità che sono interconnesse e si attivano in parallelo.

Controllori, vincoli meccanici, sincronizzazioni

L'innervazione "parallela" della mano e del piede (e non un feed-back cinestetico) spiega perché le due estremità possano essere associate con facilità nei movimenti isodirezionali e con difficoltà nei movimenti in opposizione di fase. Tuttavia rimane da capire come i due movimenti possano mantenersi in fase al crescere del ritmo di esecuzione malgrado le differenze, naturali o artificialmente indotte, nelle proprietà meccaniche di mano e piede. Qualche risposta a

questa domanda è scaturita dall'analisi dei movimenti oscillatori di un singolo segmento in diversi contesti biomeccanici. Una semplice oscillazione della mano richiede schemi di attività muscolare diversi tra loro a seconda della posizione della mano stessa. Per esempio la mano prona con l'avambraccio appoggiato a un bracciolo e a muscoli rilassati, raggiunge un equilibrio passivo se si pone in una posizione semiflessa. Se si fa oscillare la mano intorno a questa posizione di equilibrio, i muscoli antagonisti si alternano dandosi il cambio ogni volta che la mano attraversa la posizione di equilibrio. Se invece si fa oscillare la mano soltanto al di sopra della posizione di equilibrio, il movimento viene sostenuto dal solo muscolo estensore, che si mantiene in attività per tutto il ciclo di movimento: prima per produrre l'estensione e poi per frenare la flessione che avviene per gravità. Quando la mano è mantenuta semi-prona e la flessione estensione viene attuata sul piano orizzontale, la singola posizione di equilibrio si allarga a un settore di circa 25° e l'alternanza tra gli antagonisti avviene ora all'ingresso del movimento nel settore di equilibrio, ossia in posizioni diverse nella fase di flessione e di estensione. In tutti i casi l'attivazione di un determinato muscolo interviene proprio giusto nel momento in cui è richiesta una forza attiva per vincere una resistenza al moto e cessa quando subentrano altre forze, sia attive come la contrazione dell'antagonista sia passive come la forza peso o quella generata dall'elasticità articolare. Questa "regola" si applica anche quando il contesto meccanico della mano viene modificato dall'applicazione di resistenze esterne supplementari.

Dunque il sistema nervoso sa adeguare

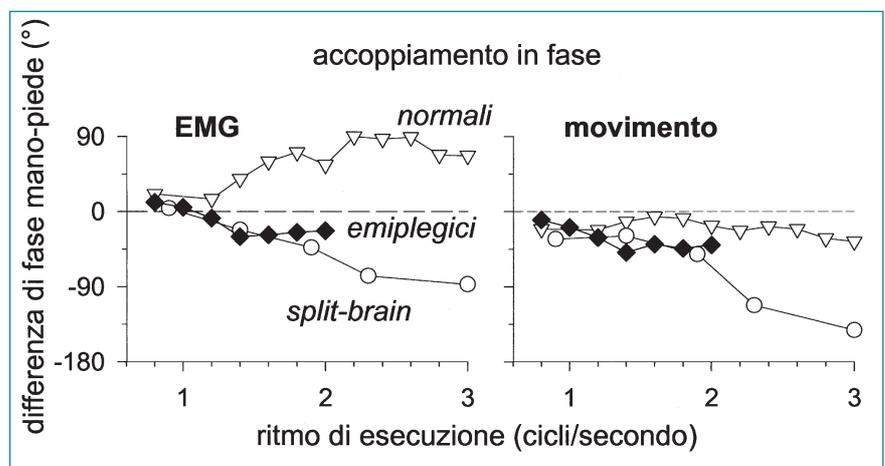


Fig. 8 - I movimenti eseguiti dagli emiplegici con mano e piede del lato sano perdono progressivamente di sincronia al crescere della frequenza di esecuzione (grafico a destra). Lo stesso difetto è presente anche in un paziente che ha subito la callosotomia. La perdita di fase è dovuta all'assenza della reazione compensatoria che anticipa l'attivazione dei muscoli che muovono la mano, come risulta, nel grafico di sinistra, dal confronto tra la curva con triangoli, rappresentativa dell'anticipo dell'ECR sul TA nei soggetti normali, e le curve con rombi pieni e cerchi vuoti, riferite rispettivamente agli emiplegici e al soggetto con callosotomia che ne ha disconnesso gli emisferi cerebrali (split-brain).

immediatamente gli schemi di attivazione muscolare alle resistenze che di volta in volta vanno superate per far proseguire il movimento. Sulla base di questa constatazione si è ipotizzato che l'adeguamento si attui attraverso un controllore a *feedback* che provveda a mantenere il segmento in movimento lungo la traiettoria programmata. Il dispositivo si fonda su "neuroni" integratori su cui convergono, da un lato, il comando volontario (codificato come la successione delle posizioni "volute") e, dall'altro, la posizione attuale del segmento (codificata dalle afferenze periferiche). Dalla differenza tra i due segnali, che mette in evidenza l'"errore" tra quanto voluto e quanto attuato, si origina un segnale diretto alla muscolatura, di ampiezza e segno (agonisti verso antagonisti) tali da correggere l'errore ed eliminare la differenza tra "intenzione" e "attuazione". Una rete neurale che operi secondo questi principi, connessa a un modello meccanico del segmento considerato, riesce a compensare l'effetto dei carichi applicati e a mantenere l'opportuno sincronismo tra il "comando centrale" e il risultato meccanico. Tornando ai movimenti associati, se si ammette che ciascun arto sia fornito di un "controllore di posizione" che adegua in modo continuo il movimento al comando che lo promuove superando le contingenze del contesto biomeccanico, si può prevedere che l'accoppiamento tra mano e piede si attui in modo automatico. Essendo "agganciate" allo stesso generatore centrale del ritmo ed essendo ciascuna provvista di un suo "controllore di posizione" che adegua i movimenti al comando centrale, le due estremità risulterebbero infatti anche sincronizzate tra loro.

In questa prospettiva, le afferenze cinestesiche che regolano l'associazione sarebbero dunque le stesse che governano il movimento di ciascun singolo segmento, senza necessità che durante l'accoppiamento intervengano ulteriori dispositivi che scambino informazioni sulla posizione reciproca degli arti.

Associazioni facili e difficili

Nel loro insieme questi risultati dimostrano e insieme confutano l'ipotesi di partenza: è ben vero che durante il movimento di una sola delle estremità qualcosa accade, subliminatamente, a carico dell'altra, ma quest'effetto non deriva dalle afferenze generate dal movimento. Gli esperimenti dimostrano infatti che durante i movimenti del piede si attuano variazioni simultanee di eccitabilità sia nelle aree corticali che muovono il piede sia nelle aree che proiettano alla mano, anche se questa è mantenuta immobile (schema della **Fig. 7**). Mentre le prime provocano l'attivazione esplicita dei muscoli

della gamba, le seconde inducono una modulazione subliminare delle vie motorie dirette alla mano, fino a livello dei motoneuroni spinali.

Esistono numerose osservazioni sperimentali, ottenute in altri contesti, che documentano come in occasione di movimenti discreti di singoli segmenti corporei si attivano anche aree corticali diverse da quella direttamente deputata a indurre il movimento. Per esempio ogni movimento volontario è accompagnato, o addirittura immediatamente preceduto, dai cosiddetti Aggiustamenti Posturali Anticipatori (APA,⁹⁻¹⁶), che consistono nella contrazione di muscoli diversi da quelli impegnati nel movimento primario, al fine di creare catene di fissazione o di contrastare gli sbilanciamenti posturali che il movimento provocherà. Queste azioni posturali, che anticipano e accompagnano il movimento, sono state oggetto di un articolo comparso nel 1992 (fascicolo n. 2) su questa stessa Rivista. Si richiama un semplice esempio tratto da quell'articolo: si supponga di sollevare un peso flettendo le due braccia. L'attività esecutiva dei bicipiti è preceduta da un'attivazione posturale dei tricipiti surali che prudentemente portano indietro il baricentro, impedendo al peso di trascinarci in avanti. Se si aumenta il peso aumenta il ritardo tra la contrazione del tricipite surale e quella dei muscoli esecutivi: in sostanza il sollevamento non inizia finché il corpo non si è portato indietro abbastanza per poter contrastare la prevedibile destabilizzazione.

Gli aggiustamenti posturali anticipatori (APA) prevedono l'attivazione parallela di muscoli anche distanti tra loro¹⁷ e spesso consistono in sinergie isodirezionali; sono scalati in rapporto all'intensità dell'azione primaria e possono ridursi o scomparire quando si modifichi il contesto biomeccanico. Nell'ambito di tali attività è dunque prevedibile che insieme con l'attivazione della corteccia che sostiene il movimento primario siano attivate anche le aree corticali "satelliti" deputate a distribuire gli aggiustamenti posturali, ciascuna con intensità adeguata alla particolare situazione biomeccanica: intensità che, in determinate occasioni, può anche divenire sottoliminare. Perciò non è inverosimile postulare che la preferenza per le associazioni isodirezionali, che sembra fondarsi sull'attivazione sincrona appaiata anche se di diversa entità delle aree corticali di mano e piede, sia espressione dell'organizzazione neurale deputata al controllo posturale. Ovvero si possono muovere insieme due segmenti corporei soltanto se ci si mantiene entro gli schemi imposti dal controllo posturale. Se da questi si vuole uscire, il movimento diventa difficile.

La fisioterapia osserva, la fisiologia spiega: insieme è meglio

Lo studio dei movimenti associati si attende altri importanti contributi dalla fisioterapia, contributi che, in prospettiva, potrà ricambiare aiutando a meglio comprendere l'origine delle alterazioni funzionali che sottendono i disturbi motori e, magari, a individuare utili percorsi terapeutici. Alcuni progressi in questo senso sono già stati compiuti valutando il comportamento di pazienti affetti da lesioni di diverse strutture nervose. Per esempio, nei pazienti con emiplegia ictale che pur non lamentano alcuna caduta delle prestazioni motorie dal lato indenne l'esecuzione di movimenti associati mano-piede da quel lato dimostra la presenza di importanti alterazioni nel controllo del sincronismo¹⁸, sia per i movimenti in fase (**Fig. 8**) che per i movimenti in antifase. Nei movimenti in fase i pazienti emiplegici non riescono a mantenere l'associazione a ritmi superiori ai 2 cicli/s circa (contro gli almeno 3 cicli/s dei soggetti normali). Inoltre al crescere della frequenza si evidenzia un ritardo crescente della mano sul piede che viene molto accentuato dall'applicazione alla mano di un carico inerziale. Infatti in questi soggetti manca l'anticipo nell'attivazione dei muscoli della mano che nei soggetti normali compensa le diversità biomeccaniche tra i due segmenti. L'associazione in antifase è ancor più compromessa e non viene eseguita a frequenze superiori a un 1 ciclo per secondo. In sintesi è ben vero che dal lato "indenne" i movimenti di mano e piede sono sotto il controllo dello stesso emisfero: pur tuttavia coordinarli al meglio è ora impossibile. Sembra dunque che l'accoppiamento in sincronia degli arti ipsilaterali richieda l'intervento di entrambi gli emisferi. Questo concetto ha trovato conferma dall'esame di un soggetto sottoposto a callosotomia, nel quale i difetti descritti per gli emiplegici erano ancor più accentuati e presenti in egual misura da un lato e dall'altro¹⁹.

Anche nei pazienti resi atassici dall'asportazione chirurgica di parti del cervelletto l'esecuzione dei movimenti associati è alterata²⁰. In particolare, dopo ablazione di porzioni degli emisferi cerebellari i soggetti eseguono i movimenti associati in maniera simile a quella del soggetto con callosotomia, mostrando un progressivo aumento del ritardo di fase della mano rispetto al piede quando incrementano la frequenza dei movimenti e l'incapacità di anticipare l'attivazione muscolare della mano. Dopo lesioni vermiane o paravermiane, i soggetti mantengono invece questa capacità e riescono a tenere costante il rapporto di fase tra mano e piede.

Dunque, ora capiamo meglio perché un bambino trova difficile (e proprio per questo,

anche divertente) “far andare al contrario” le mani, o la mano e il piede. Questo ci aiuterà forse a capire meglio perché in certi pazienti alcuni movimenti, e alcune associazioni fra movimenti, diventano più difficili o addirittura impossibili, anche quando i singoli muscoli sono ben reclutabili.

Ma, a partire dalla intelligente osservazione di un fisiatra curioso troviamo, in questa storia, la conferma di un'importante linea guida metodologica che è quella di osservare il movimento secondo una visione unitaria, capace di coglierne l'interazione fra aspetti meccanici e nervosi, fra componenti volontarie e componenti “involontarie-posturali” e fra sensazione ed esecuzione.

BIBLIOGRAFIA

- 1) MEIGE H. *Les mouvements en miroir: leurs application pratique et thérapeutiques* **Rev Neurol** 1901; 19: 780.
- 2) MÜLLER J. *Handbuch der Physiologie der Menschen*, Hölscher Koblenz 1840.
- 3) NOICA (Bucarest). *Étude sur les mouvements associés de l'homme normal et des malades* **L'Encéphale**, 1912; 3: 201-221.
- 4) BALDISSERA F, CAVALLARI P, CIVASCHI P. *Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs*. **Neurosci Lett** 1982; 34: 95-100.
- 5) BALDISSERA F, BORRONI P, CAVALLARI P. *Neural compensation for mechanical differences between hand and foot during coupled oscillations of the two segments*. **Exp Brain Res** 2000; 133: 165-177.
- 6) BALDISSERA F, CAVALLARI P. *Neural compensation for mechanical loading of the hand during coupled oscillations of the hand and foot*. **Exp Brain Res** 2001; 139: 18-29.
- 7) BALDISSERA F, BORRONI P, CAVALLARI P, CERRI G. *Excitability changes in human corticospinal projections to forearm muscles during voluntary movement of ipsilateral foot*. **J Physiol** 2002; 539: 903-911.
- 8) CERRI G, BORRONI P, BALDISSERA F. *Cyclic H-reflex modulation in resting forearm related to contractions of foot movers, not to foot movement*. **J Neurophysiol** 2003; 90: 81-88.
- 9) ARUIN AS, LATASH ML. *Directional specificity of postural muscles in feed-forward postural reactions during fast voluntary arm movements*. **Exp Brain Res** 1995; 103: 323-332.
- 10) ARUIN AS, LATASH ML. *Anticipatory postural adjustments during self-initiated perturbations of different magnitude triggered by a standard motor action*. **EEG Clin Neurophysiol** 1996; 101: 497-503.
- 11) CHABRAN E, FOURMENT A, MATON B, RIBREAU C. *Chronology of upper limb anticipatory postural adjustments associated with voluntary wrist flexions and extensions in humans*. **Neurosci Lett** 1999; 268: 13-16.
- 12) CORDO PJ, NASHNER LM. *Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements*. **J Neurophysiol** 1982; 47: 287-302.
- 13) LIEPERT J, TERBORG C, WEILLER C. *Motor plasticity induced by synchronized thumb and foot movements*. **Exp Brain Res** 1999; 125: 435-9.
- 14) MARSDEN CD, MERTON PA, MORTON HB. *Anticipatory postural responses in the human subject [proceedings]*. **J Physiol** 1978; 275: 47P-48P.
- 15) NASHNER LM, FORSSBERG H. *Phase-dependent organization of postural adjustments associated with arm movements while walking*. **J Neurophysiol** 1986; 55: 1382-1394.
- 16) ZATTARA M, BOUISSET S. *Posturo-kinetic organisation during the early phase of voluntary upper limb movement. 1. Normal subjects*. **J Neurol Neurosurg Psych** 1988; 51: 956-965.
- 17) BOUISSET S, ZATTARA M. *Biomechanical study of the programming of anticipatory postural adjustments associated with voluntary movement*. **J Biomech** 1987; 20: 735-742.
- 18) BALDISSERA F, CAVALLARI P, TESIO L. *Coordination of cyclic coupled movements of hand and foot in normal subjects and on the healthy side of hemiplegic patients*. In: Swinnen SP, Heuer H, Massion J, Caesaer P (Eds.): "Interlimb Coordination: Neural, Dynamical, and Cognitive Constraints". **Academic Press San Diego CA** 1993, pp. 229-242.
- 19) BALDISSERA F, CAVALLARI P. *Impairment in the control of coupled cyclic movements of ipsilateral hand and foot after total callosotomy*. **Acta Psychol** 2003; 110: 289-304.
- 20) CERRI G, ESPOSTI R, LOCATELLI M, CAVALLARI P. *Coupling of hand and foot voluntary oscillations in patients suffering cerebellar ataxia: different effect of lateral or medial lesions on coordination*. **Prog Br Res** 2004, in stampa. ■