

IL PROGRAMMA MOTORIO COME APPLICAZIONE DI SISTEMI MODULARI A FEED-BACK (Terza parte)

Prima di parlare molto brevemente delle teorie che portano ad ipotizzare l'esistenza di centri spinali capaci di una *generazione autonoma* (negli articoli precedenti si è trattato di un sistema autonomo di *controllo*) del movimento indipendentemente dall'attività dei centri superiori, è bene premettere che queste sono state formulate sulla base di studi (principalmente elettromiografici) sul passo di animali (non bipedi) in particolari condizioni standard di laboratorio: questo significa che la loro validità potrebbe non essere assoluta e che i risultati ottenuti non sono direttamente applicabili all'uomo.

I dati così raccolti, tuttavia, rappresentano una suggestiva ipotesi di lavoro per migliorare ed eventualmente modificare le nostre cognizioni sulla locomozione umana in genere e su quella dell'atleta in particolare poiché quest'ultimo fornisce le sue prestazioni motorie in un ambiente standard e pertanto ne garantisce la ripetibilità indipendentemente da variabili esterne al suo organismo.

Grillner, Rossignol e Forsberg partendo dal fatto che in ogni arto portante il passo comprende due fasi che si susseguono regolarmente: una, detta di *oscillazione*, che si compie quando l'arto è staccato da terra e si muove in avanti rispetto all'articolazione dell'anca, ed una, detta di *appoggio*, che si compie quando l'arto poggia sul suolo e si sposta all'indietro rispetto all'anca, osservarono che la fase propulsiva è limitata al periodo d'appoggio e che la durata della fase di oscillazione rimane relativamente costante al variare della velocità di spostamento.

L'incremento di velocità risulta pertanto strettamente legato alla quantità di forza sviluppata nell'appoggio (misurabile mediante una pedana piezoelettrica), alla durata dell'appoggio stesso ed alla lunghezza della falcata, cioè all'ampiezza dell'estensione articolare che è possibile ottenere nella fase oscillante.

Durante la marcia gli impulsi nervosi provenienti dai muscoli estensori e flessori si alternano, ma i primi muscoli ad essere eccitati quando si tratta di incominciare la locomozione sono i flessori; gli estensori, d'altro canto, diventano attivi un po' prima della fase di oscillazione permettendo l'estensione più o meno completa della zampa ed il compimento del passo in dipendenza dai vincoli meccanici rappresentati dalla allungabilità dei muscoli interessati e dalla disposizione anatomica delle loro inserzioni ossee.

Il problema di coordinare l'inizio dell'attività flessoria nei vari muscoli di un arto in modo da fargli mutare posizione nello spazio è a carico del SNC, ed è un problema che ci appare tuttora molto complesso e di cui si sa ancora poco.

Quello che invece Grillner e coll. hanno studiato con discreti risultati è stato il meccanismo, o i meccanismi, responsabili della generazione dell'andamento alterno di attività muscolare nei flessori e negli estensori.

Essi notarono che, nella zampa posteriore di un gatto spinalizzato (ossia a cui è stato sezionato il midollo spinale al di sotto del bulbo) in cui erano state sezionate le radici spinali posteriori (e cioè impedita la possibilità di ricevere impulsi sensoriali) non si alterava, una volta incominciato il passo, la sequenza temporale di attivazione dei diversi muscoli dell'arto preso in considerazione. (Occorre far rilevare però che il fatto che si riesca ad ottenere la continuazione del passo anche in assenza di stimoli sensoriali non significa che questi ultimi non rivestano importanza: essi infatti sono fondamentali nell'adattare il passo alle varie condizioni del terreno).

Questa osservazione, aggiunta all'osservazione che la fase di oscillazione ha una durata pressoché costante qualunque sia la durata dell'appoggio ha portato questi ricercatori a ipotizzare l'esistenza di un programma motorio stereotipato che si innesca ogni volta che un segnale sensoriale indica l'estensione della gamba.

Perché incominci la fase di oscillazione sembra necessitino due condizioni: 1) l'articolazione dell'anca deve essere tesa; 2) i muscoli estensori devono essere scarichi; entrambe queste condizioni si verificano verso la fine della fase di appoggio.

Grillner e coll. dimostrarono inoltre che inibendo l'estensione completa della zampa posteriore di un gatto spinalizzato si inibisce il passo di quella zampa, se l'inibizione è rimossa il passo riprende.

Lo stimolo sensoriale di estensione ha inoltre la funzione (oltre che di far scattare il programma motorio da una fase all'altra) di modificare la risposta motoria in una singola fase.

Infatti essi hanno dimostrato che stimolando i recettori cutanei della parte inferiore della zampa di un gatto spinalizzato si provoca un notevole aumento dell'attività elettrica dei flessori della zampa che, di conseguenza, viene alzata più in alto.

Il significato finalistico di questa reazione è quello di evitare un ostacolo fisso durante il cammino ma il significato funzionale è ben più interessante: infatti è la dimostrazione che per l'evitamento di un ostacolo fisso non è strettamente necessaria un'integrazione a livello superiore.

Sulla base di questi lavori e di loro esperienze sulla blatta, Pearson ed Ilas dimostrarono l'esistenza di un gruppo di cellule nervose interconnesse in grado di generare un ritmo reciproco di attività nella zampa posteriore della blatta. Essi designarono questo sistema come « generatore dell'attività flessoria » che eccita periodicamente i motoneuroni dei muscoli flessori e, di conseguenza, inibisce quelli che servono gli estensori che invece sono eccitati costantemente dalla scarica del SNC.

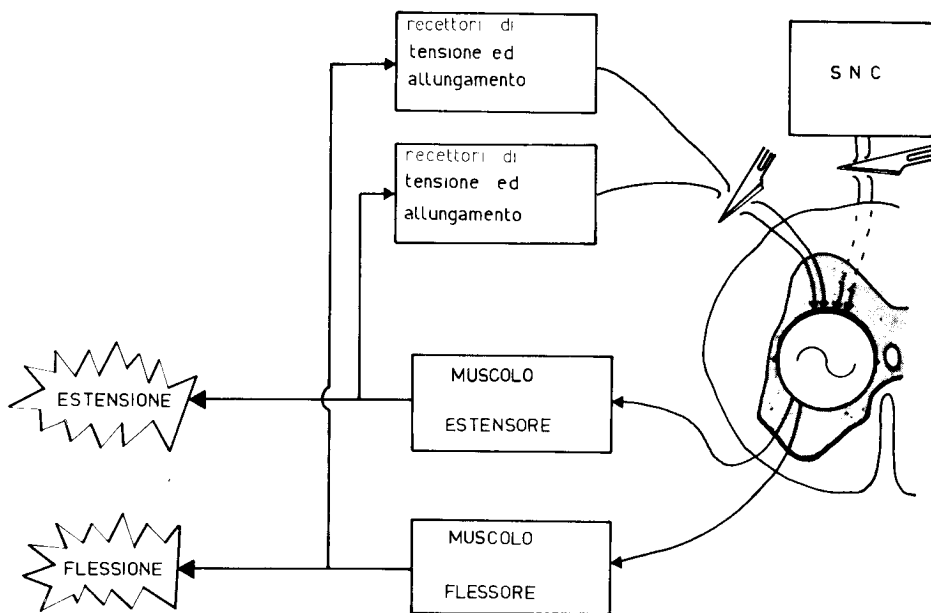


Fig. 1 - L'ipotesi dell'esistenza di un centro spinale autonomo in grado di generare un'attività alternata di flessione ed estensione spiega come il passo prosegua anche dopo la sezione delle vie provenienti dai Centri Superiori (spinalizzazione) e delle vie provenienti dai recettori muscolotendinei deputati al controllo della lunghezza e della tensione muscolare (sezione delle radici posteriori).

Il generatore dell'attività flessoria dà origine ad una attività elettrica costante nella durata qualunque sia la velocità con cui gli stimoli vengono prodotti: il risultato è che la fase di oscillazione varia molto poco con la velocità dell'andatura.

L'inibizione dei generatori dell'attività flessoria da parte di uno stimolo sensoriale proveniente dalla cute è un segnale sufficiente per permettere all'animale di adattare automaticamente la sua andatura al terreno in cui cammina e permettergli così un equilibrio stabile.

Ogni generatore dell'attività flessoria può essere visto perciò come un elemento decisionale semplice che inizia il passo quando le informazioni che gli provengono dai recettori di pressione periferici e dai recettori che esplorano l'attività degli altri muscoli lo consentono. La fig. 1 rappresenta uno schema a blocchi del circuito decisionale spinale.

In queste tre note sulla genesi del movimento abbiamo visto come il movimento che si effettua durante un passo sia determinato da alcuni elementi nervosi collegati tra loro in modo da costituire un insieme unico la cui azione viene coordinata ed in parte mantenuta con una dinamica interna di tipo feed-back.

Tale sistema è in grado di ricevere e valutare impulsi sensoriali provenienti dai muscoli e di elaborare ed inviare impulsi motori ai muscoli. La possibilità di una generazione autonoma di impulsi motori

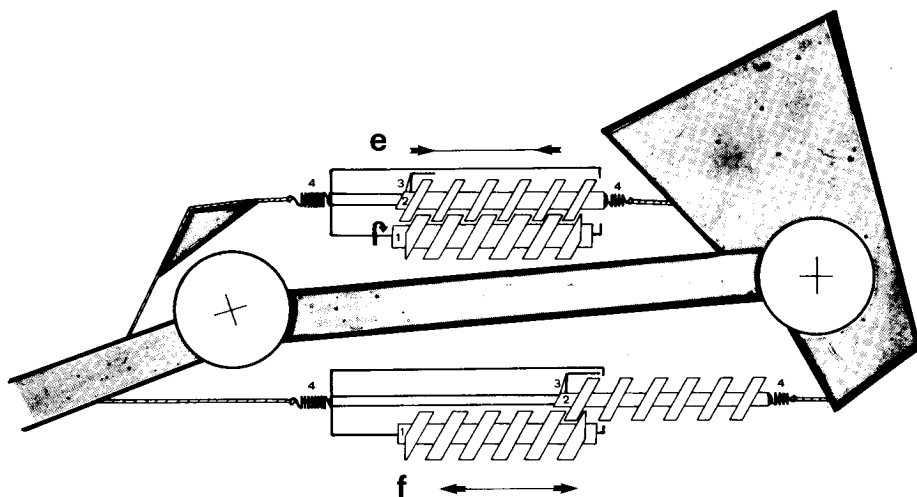


Fig. 2 - Si è qui rappresentata, in maniera molto semplificata, la connessione biomeccanica esistente tra i muscoli estensori (e) e flessori (f) del ginocchio. Gli ingranaggi (1; 2) rappresentano le unità contrattili dei muscoli considerati; le molle rigide (4) ed i cavi i loro mezzi di connessione ai segmenti ossei. (Poiché i mezzi di connessione muscolari sono costituiti in gran parte da tessuto tendineo, l'estensibilità delle molle è molto piccola). Quando la vite senza fine (1) fa presa sulla barra (2) il sistema (e) si accorcia (in altre parole i muscoli estensori si contraggono, inclinano in avanti il bacino, innalzano la tibia ed estendono la gamba) mentre nel sistema (f) la barra (2) ingrana sulla vite (1) fino a quando il fermo (3) non va ad urtare sulla flangia del cilindro che contiene gli ingranaggi. Il fermo (3) rappresenta dunque il limite meccanico imposto all'estensione dell'intero sistema (e-f), anche se un'ulteriore, ridottissima, estensione è permessa dallo stirarsi delle molle rigide (4). (Dal punto di vista clinico il fermo (3) del sistema (f) rappresenta lo stato tonico di contrazione dei muscoli flessori del ginocchio). Quando il fermo (3) urta contro la flangia del cilindro possono verificarsi, in dipendenza dalla resistenza relativa delle strutture che compongono il sistema, tre conseguenze principali: a) deformazione del fermo e/o della flangia e/o sspanatura degli ingranaggi (stiramento muscolare); b) rottura del fermo e/o della flangia (rottura muscolare); c) rottura delle molle e/o dei cavi (rottura perimurale e/o tendinea).

garantisce all'organismo una certa indipendenza dai Centri Nervosi Superiori e quindi una maggior velocità nella risposta a stimoli sensoriali semplici quali quelli che possono essere elicitati da una pista da atletica.

Il sistema è alimentato dai segnali di controllo della lunghezza e della tensione relativa dei muscoli che serve, ed è regolato in modo da mantenere costante la fase oscillante del passo.

In questo programma motorio intervengono pertanto le seguenti variabili principali: 1) Rapporti e morfologia dei segmenti ossei che fungono da punti fissi di inserzione per i muscoli interessati al movimento; 2) Velocità di conduzione all'interno delle strutture nervose che regolano il sistema; 3) Efficienza degli effettori muscolari. La variabile su cui si può intervenire anche senza un aiuto farmacologico è la terza.

Infatti la capacità di estensione dell'arto inferiore nella fase oscil-

lante del passo è biomeccanicamente in diretta dipendenza dal vincolo che i muscoli flessori esercitano sull'articolazione del ginocchio (Fig. 2).

Pertanto, se l'attività generatoria del movimento è involontaria, o, quanto meno, è svincolabile dall'attività del SNC, una possibilità di intervento sull'efficacia del passo ci è data dal fatto che è possibile controllare anche l'ampiezza della fase di estensione (che durante il passo rimane costante) agendo sul vincolo meccanico rappresentato dai muscoli flessori del ginocchio, ossia ottenendo la massima distensione possibile.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Banker B.O., Przybylski R.J., Van Der Meulen J.P., Victor M.: « Research in muscle development and the muscle spindle », Ed. Excerpta Medica, 1972.
- 2) Buller A.J.: « Anatomy of the motor unit » in J.N. Walton « Disorders of voluntary muscles » Ed. Churchill & Livingstone, 1974.
- 3) Chusid J.G.: « Correlative neuroanatomy and functional neurology » 15th Ed., Range, 1974.
- 4) Close R.I.: « Dynamic properties of mammalian skeletal muscle » *Physiol. Rev.* 52, 129; 1972.
- 5) Ganong W.F.: « Fisiologia Medica », VII Ed., Piccin 1977.
- 6) Gray G.: « Animal locomotion », W.W. Norton & Co., N.Y. 1968.
- 7) Grillner S., Udo M.: « Motor unit activity and stiffness of the contracting muscle fibers in the tonic stretch reflex », *Acta Physiol. Scand.* 81, 442, 1971.
- 8) Hoepke H., Kanter M.: « Das Musklespiel des Menschen », G. Fischer Verlag, 1972.
- 9) Katz B.: « Nervi, muscoli e sinapsi », Zanichelli, 1971.
- 10) Kornhuber H.H.: « Motor function of the cerebellum and basal ganglia: the cerebellocortical saccadic (ballistic) clock, the cerebellonuclear hold regulator, and the basal ganglia ramp (voluntary speed smooth movement) », *Kybernetik* 8, 157, 1971.
- 11) Mountcastle W.D.: « Medical Physiology » vol. II, XXX Ed., C.V. Mosby Co., 1974.
- 12) Pavlov I.P.: « I riflessi condizionati », Einaudi, 1940.
- 13) Pearson K.: « Il controllo della locomozione animale », *Le Scienze*, 38, 103 1977.
- 14) Poppele R.E., Bowman R.G.: « Quantitative description of linear behavior of mammalian muscle spindle », *J. Neurophysiol.* 33, 59, 1970.
- 15) Severin F.V., Orlovskii G.N., Shik M.L.: « Work of the muscle receptors during controlled locomotion » *Biophysics*, 12, 575 1967.
- 16) Sisson H.A.: « Anatomy of the motor unit » in J.N. Walton: « Disorders of voluntary muscle », Ed. Churchill & Livingstone, 1974.