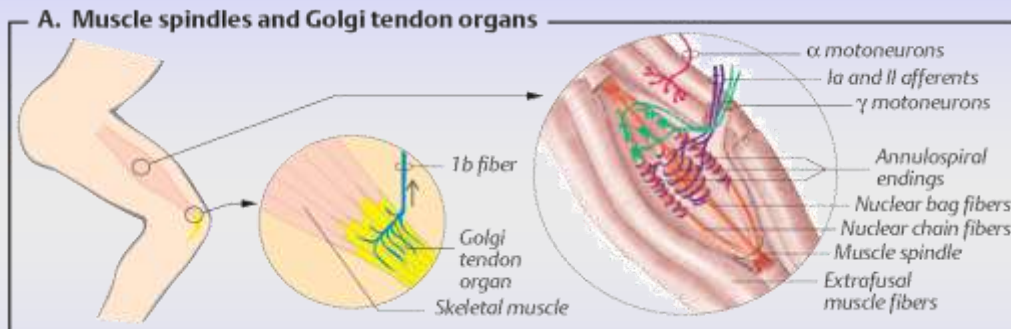


Controllo muscolare



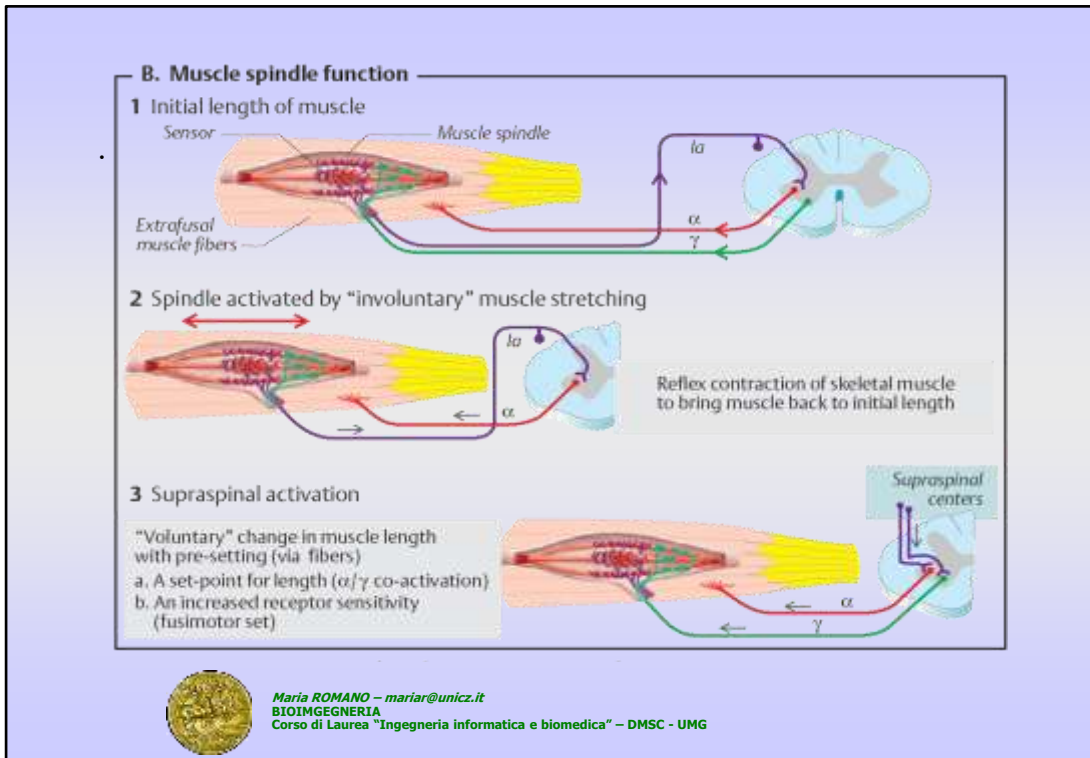
Maria ROMANO – maria@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Organo tendineo del Golgi e fusi muscolari



Maria ROMANO – mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Il fuso muscolare è costituito da un numero di fibre muscolari variabile da 5 a 14. Ve ne sono di due tipi, a catena sottile, con i nuclei tutti allineati, e a borsa nucleare, con i nuclei concentrati tutti al centro della fibra. Ciascun fuso neuromuscolare è composto da una regione centrale non striata e non contrattile, e da due regioni terminali striate e contrattili.



La regione centrale delle fibre intrafusali è innervata da fibre sensitive (di tipo Ia e II) le cui terminazioni si avvolgono a spirale. Queste fibre sensitive sono dotate di canali ionici stiramento-dipendenti, che quindi si attivano con la deformazione meccanica delle fibre sensitive, dovuta alla deformazione meccanica delle fibre muscolari intrafusali. Le fibre sensitive, dunque, modulano la frequenza di scarica dei potenziali d'azione in base allo stato tensionale del muscolo (allungamento o accorciamento), fornendo queste informazioni al SNC, costituendo quindi delle vie afferenti.

Le regioni terminali delle fibre intrafusali sono innervate dai gamma-motoneuroni con delle placche motrici. I gamma-motoneuroni costituiscono delle vie efferenti, che formano sinapsi nel midollo spinale con le terminazioni nervose dei centri sopraspinali. Più che stimolare le terminazioni contrattili del fuso muscolare per dare un contributo, tra l'altro esiguo, alla forza muscolare, la funzione dei gamma-motoneuroni è quella di modulare la sensibilità delle fibre afferenti all'allungamento del fuso.

Infatti, l'acetilcolina rilasciata dalle placche motrici dei gamma-motoneuroni determina la contrazione delle regioni terminali del fuso e dunque lo stiramento della regione centrale non-contrattile, causando l'attivazione dei canali ionici stiramento-dipendenti del sodio, con conseguente afflusso di ioni Na^+ , che incrementano il potenziale di riposo delle terminazioni delle fibre afferenti, aumentando la probabilità di scarica di potenziali d'azione, cioè la sensibilità allo stiramento di tali fibre.

Organi tendinei del Golgi

- **Inibizione autogena**
 - Sino ad un certo punto, un muscolo si contrae tanto più energicamente quanto più forzatamente è stirato.
 - Se però la trazione esercitata raggiunge valori eccessivi, la contrazione cessa bruscamente.
- **I recettori per questo riflesso sono gli organi tendinei del Golgi.**



Maria ROMANO – maria@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

I recettori tendinei del Golgi sono innervati da fibre sensitive di tipo Ib, che formano delle sinapsi con gli interneuroni inibitori presenti nel midollo spinale. I recettori del Golgi rispondono prevalentemente a contrazioni isometriche, durante le quali la contrazione muscolare determina lo stiramento dei tendini che agiscono da componente elastica. Gli interneuroni eccitati dagli organi tendinei del Golgi inibiscono gli alfa-motoneuroni che innervano le fibre extra-fusali, impedendo così la propagazione dei potenziali d'azione alle placche motrici delle fibre innervate e quindi la loro contrazione.

Questo riflesso generalmente rallenta la contrazione muscolare quando la tensione muscolare aumenta e, superata una certa «soglia di sicurezza», determina un rilascio della tensione muscolare per prevenire l'eccessiva contrazione che potrebbe danneggiare il muscolo.

Arco riflesso

- *L'unità fondamentale dell'attività nervosa integrata è l'arco riflesso.*
- *Esso consta di:*
 - un organo di senso
 - un neurone afferente
 - una o più sinapsi nella sezione centrale integrante
 - un neurone efferente
 - un effettore.
- *Nei mammiferi e nell'uomo, le connessioni fra i neuroni somatici afferenti ed efferenti hanno luogo nell'encefalo o nel midollo spinale.*



Maria ROMANO – maria@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Controllo muscolare a feedback

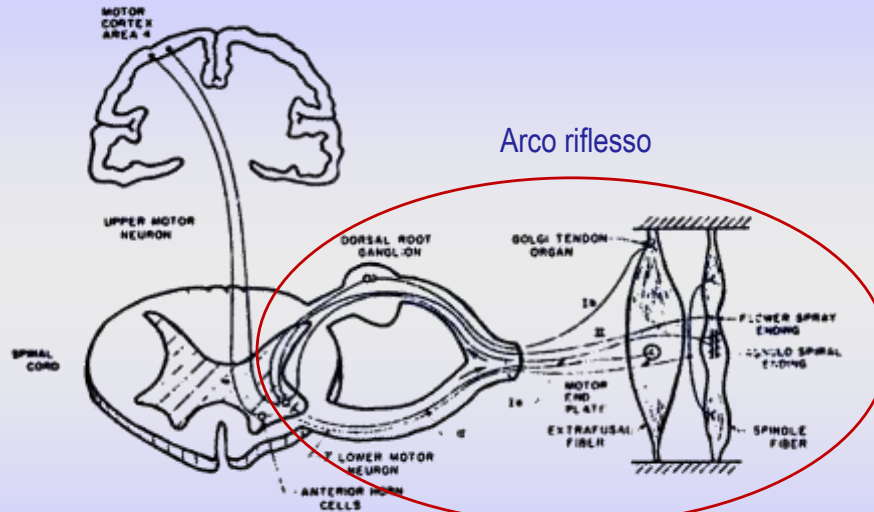


Fig. 60 - Physiologic control of skeletal muscle.



Maria ROMANO - mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" - DMSC - UMG

Riflessi mono e polisinaptici

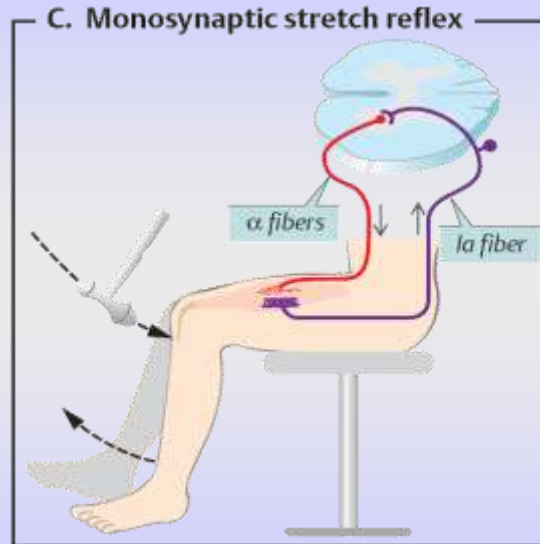
- L'arco riflesso più semplice è quello con una sola sinapsi tra neurone afferente ed efferente:
 - ✦ arco monosinaptico
- Riflessi monosinaptici si chiamano quelli da esso mediati.
- Quando nell'arco riflesso sono interposti degli interneuroni si parla di archi riflessi polisinaptici.



Maria ROMANO – maria@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

1

Controllo muscolare a feedback



Maria ROMANO – mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Quello in figura è un tipico esame clinico, che serve a valutare l'efficienza del RIFLESSO PATELLARE, cioè il riflesso da stiramento monosinaptico del quadricipite femorale provocato da un colpo al tendine patellare del ginocchio.

Nel riflesso da stiramento monosinaptico del quadricipite, il colpo del martelletto causa uno stiramento dei tendini, che lo trasmettono al quadricipite e quindi ai suoi fusi, che rilevano uno stiramento e aumentano la frequenza di scarica dei potenziali d'azione che si propagano lungo le fibre Ia fino al midollo spinale, dove stimolano gli alfa-motoneuroni che innervano le fibre muscolari del quadricipite attraverso connessioni monosinaptiche, determinando quindi la propagazione di potenziali d'azione lungo gli alfa-motoneuroni fino alla placche motrici, determinando quindi i fenomeni della contrazione già descritti precedentemente (rilascio di acetilcolina, potenziale di end-plate, potenziale d'azione lungo il sarcolemma e i tubuli trasversali fino al reticolo sarcoplasmatico, rilascio del calcio che si lega all'actina consentendo l'aggancio delle teste della miosina che determinano lo slittamento delle catene e quindi la contrazione).

È errore comune pensare che, poiché il martelletto colpisce i tendini, questi siano coinvolti direttamente nell'arco riflesso, cioè attraverso i recettori tendinei del Golgi.

Ricordiamoci sempre che gli organi tendinei del Golgi sono dei trasduttori indiretti della TENSIONE muscolare, perché, essendo degli elementi sostanzialmente elastici, presentano una deformazione dipendente dalla forza con cui vengono stirati, forza che viene esercitata dal muscolo e che quindi dipende dal suo stato tensionale. Inoltre, questi recettori si attivano sostanzialmente quando il muscolo si trova in un forte stato tensionale. Lo stiramento tendineo dovuto al colpo di martelletto è di piccola entità e non riesce ad attivare sostanzialmente i recettori del Golgi. Inoltre, al momento del colpo di martelletto, lo stiramento non è ancora arrivato al muscolo, che quindi non si è ancora contratto, per cui i tendini non sono sottoposti ad alcuna forza esercitata dal muscolo.

In questo fenomeno, dunque, i tendini esplicano solo una funzione passiva di trasmissione dello stiramento al muscolo.

I **riflessi da stiramento** sono gli unici monosinaptici (Ganong, "Fisiologia medica", pag. 68).

Tono muscolare: rappresenta la resistenza offerta da un muscolo allo stiramento.

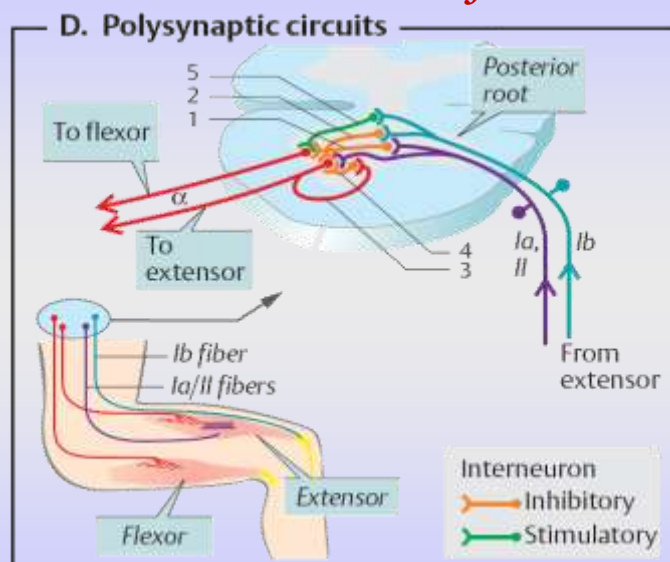
Riepilogo degli eventi di un riflesso a stiramento monosinaptico

- Allungamento passivo di un muscolo che stira le fibre intrafusali dei fusi
- Lo stiramento del fuso distorce la sua regione centrale e quindi stimola le terminazioni dendritiche dei nervi sensori
- Potenziali d'azione sono condotti dalle fibre nervose sensorie afferenti nel midollo spinale sulle radici dorsali dei nervi spinali
- Si attivano le sinapsi tra neuroni sensori e corpi cellulari dei motoneuroni somatici localizzati nelle corna ventrali del midollo spinale
- Impulsi nervosi efferenti, dei motoneuroni α , sono condotti al muscolo (fibre extrafusali)
- Il rilascio dell'acetilcolina stimola la contrazione delle fibre extrafusali e quindi dell'intero muscolo
- La contrazione del muscolo fa diminuire lo stiramento dei suoi fusi che quindi abbassano l'attività elettrica
 - ✦ Si tratta quindi di un esempio di feedback negativo



Maria ROMANO – mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Controllo muscolare a feedback

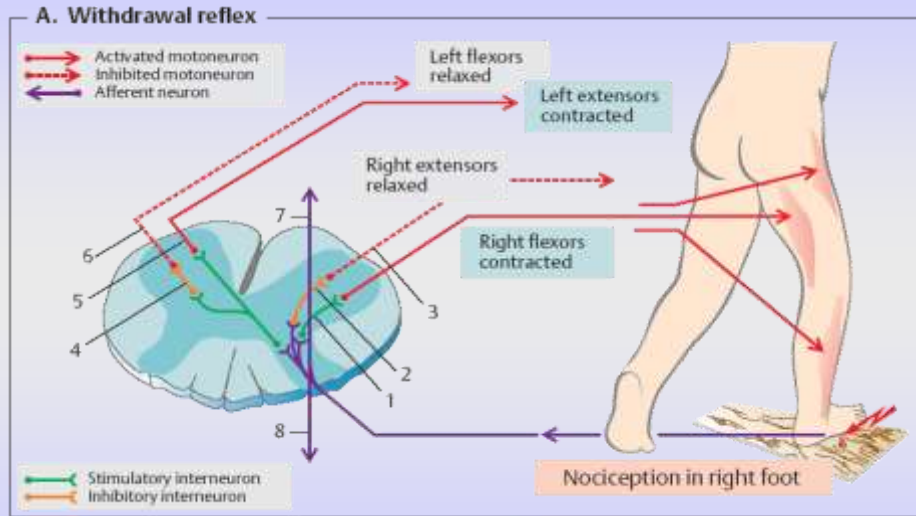


Maria ROMANO – mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Il riflesso monosinaptico da stiramento del quadricipite, in realtà, non è l'unico meccanismo che si attiva durante il test del riflesso patellare. Infatti, il movimento coordinato che consente l'esecuzione di riflesso del calcio della gamba stimolata, richiede l'azione coordinata di due muscoli antagonisti: il quadricipite femorale che deve contrarsi (e lo fa grazie al riflesso monosinaptico tra le fibre afferenti Ia del fuso e gli alfa-motoneuroni) e i muscoli posteriori della coscia che devono rilassarsi.

Come fanno a rilassarsi in maniera coordinata con il quadricipite che si contrae? Ciò avviene grazie ad una connessione, questa volta non mono-sinaptica, tra fibre afferenti Ia del fuso e alfa-motoneuroni dei muscoli posteriori della coscia, mediata da interneuroni inibitori che si trovano nel midollo spinale, quindi in questo arco riflesso che regola il rilassamento dei muscoli posteriori della coscia abbiamo due sinapsi in cascata: fibre Ia – interneuroni inibitori e interneuroni inibitori – alfa-motoneuroni.

Controllo a feedback del dolore



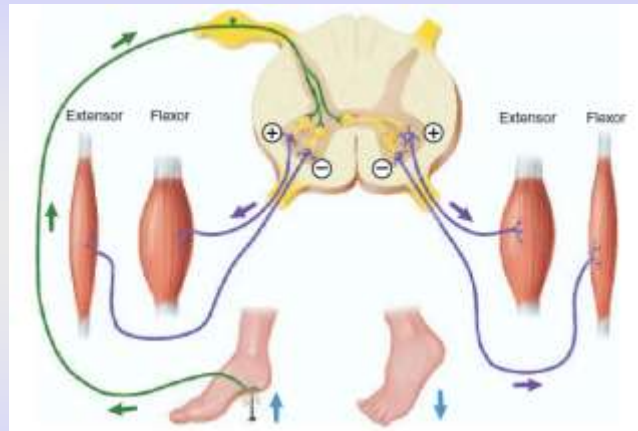
Maria ROMANO – mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Questo è un esempio di riflesso polisinpatico complesso. È il riflesso di ritiro dell'arto. Un classico esempio in cui si attiva è quello del dolore, quindi se avviciniamo una parte del corpo ad una forte fonte di calore, oppure se, come nell'immagine, pestiamo con il piede destro qualcosa che ci provoca un improvviso dolore, ad esempio qualcosa di appuntito. Cosa facciamo normalmente in questo caso? Flettiamo la gamba destra per ritirare il piede dalla fonte di dolore e, per rimanere in equilibrio, contraiamo gli estensori della gamba sinistra per sopportare l'intero peso corporeo.

Le attivazioni muscolari che si verificano in questo riflesso, sono tutte mediate da interneuroni del midollo spinale, sia stimolatori che inibitori.

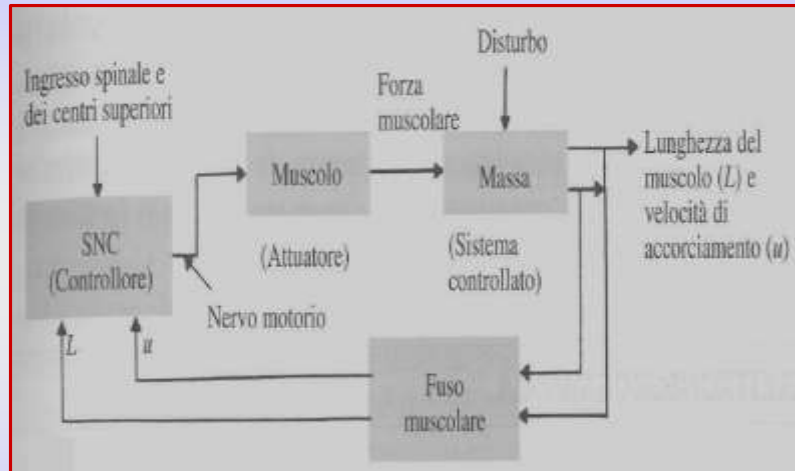
In particolare, le fibre afferenti dei nocicettori del piede, cioè i sensori del dolore, stimolano interneuroni stimolatori, che a loro volta stimolano gli alfa-motoneuroni dei flessori della gamba destra, e stimolano anche interneuroni inibitori, che a loro volta inibiscono gli alfa-motoneuroni degli estensori della gamba destra, consentendo complessivamente la sua flessione per ritirare il piede dalla sorgente di dolore.

Le fibre afferenti dei nocicettori del piede destro mediano anche il riflesso di estensione contralaterale. Come fanno? Attraverso delle sinapsi con interneuroni stimolatori, che a loro volta stimolano direttamente gli alfa-motoneuroni degli estensori della gamba sinistra, e indirettamente inibiscono, attraverso ulteriori interneuroni inibitori, gli alfa-motoneuroni dei flessori della gamba sinistra.



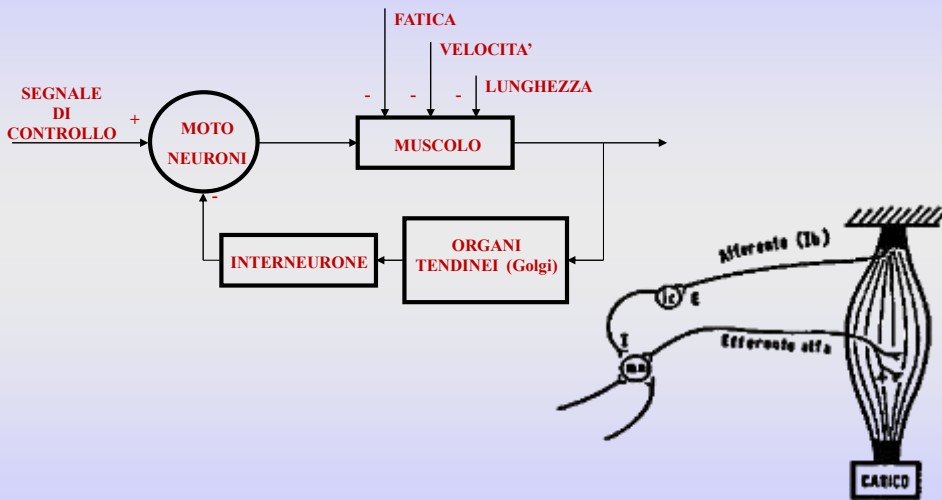
Maria ROMANO – mariar@unicz.it
 BIOINGEGNERIA
 Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Schema a blocchi



Maria ROMANO – mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Controllo muscolare a feedback



Maria ROMANO – mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Riflesso da stiramento inverso.

Questo riflesso si verifica in corrispondenza di una tensione muscolare eccessiva ed è una misura di preservazione dell'integrità del muscolo atta a prevenire danni fisici derivanti da un'eccessiva contrazione.

Come già spiegato quando abbiamo introdotto gli organi tendinei del Golgi, partiamo da una condizione in cui il SNC stimola i motoneuroni per aumentare progressivamente la contrazione muscolare. Questo è schematizzato da un ingresso di segno positivo nel componente «motoneuroni», la cui uscita è la generazione di potenziali d'azione (anche con un incremento della frequenza di scarica) per stimolare e incrementare la contrazione muscolare. Anche questo costituisce un ingresso positivo per il componente «muscolo», che ha anche degli ingressi negativi dovuti ai «disturbi esterni», quali la fatica, la velocità e la lunghezza. L'uscita del componente «muscolo» è la forza di contrazione, che viene percepita dagli organi tendinei del Golgi, che la trasducono in un segnale elettrico (sempre potenziali di azione con frequenza di scarica variabile) che viaggia sulle fibre Ib fino al midollo spinale, in cui va a stimolare gli interneuroni inibitori, che a loro volta generano un segnale inibitorio per gli alfa-motoneuroni, schematizzato come un ingresso negativo per il componente «motoneuroni».

Come già detto in precedenza, questo fenomeno si presenta inizialmente come una riduzione della velocità di contrazione del muscolo, per tensioni muscolari elevate, per poi arrivare anche ad una completa inibizione della stimolazione muscolare in corrispondenza di tensioni pericolosamente elevate.

Controllo muscolare a feedback

Il controllo della postura e del movimento richiede una coordinazione continua delle centinaia di muscoli che costituiscono l'apparato motorio del corpo umano.

Il sistema nervoso centrale deve inviare segnali di controllo appropriato a ciascuno di questi muscoli.

I componenti muscolari e nervosi funzionano insieme, costituendo il sistema di controllo periferico.

Questo sistema compensa le perturbazioni e migliora la corrispondenza tra risposta muscolare e segnali di controllo.



Maria ROMANO – maria@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Controllo posturale

The diagram illustrates the Postural Control System (Controllo Postura). It shows the flow of information from various sensory inputs to the output of muscle activity and body position. Key components include:

- SISTEMA VESTIBOLARE** (Vestibular System)
- ALTRI RECEPTORI** (Other Receptors)
- SISTEMA VISIVO** (Visual System)
- CENTRI SPINALI** (Spinal Centers)
- CENTRI SUPERIORI** (Superior Centers)
- Comandi diretti** (Direct Commands)
- Guadagno anello forza** (Force Loop Gain)
- Guadagno anello posizione** (Position Loop Gain)
- Controllo guadagno** (Gain Control)
- MUSCOLO** (Muscle)
- CORPO** (Body)
- ORGANI TENDINEI** (Tendon Organs)
- GRAVITA'** (Gravity)
- FUSO** (Spindle)
- Posizione** (Position)
- Retroazione FORZA** (Force Feedback)
- Retroazione POSIZIONE** (Position Feedback)
- Comandi di posizione** (Position Commands)

The diagram shows the integration of these components to maintain posture. The **CENTRI SPINALI** and **CENTRI SUPERIORI** are highlighted with red circles. The **Retroazione FORZA** and **Retroazione POSIZIONE** loops are also highlighted with red circles. The **Posizione** output is also highlighted with a red circle.

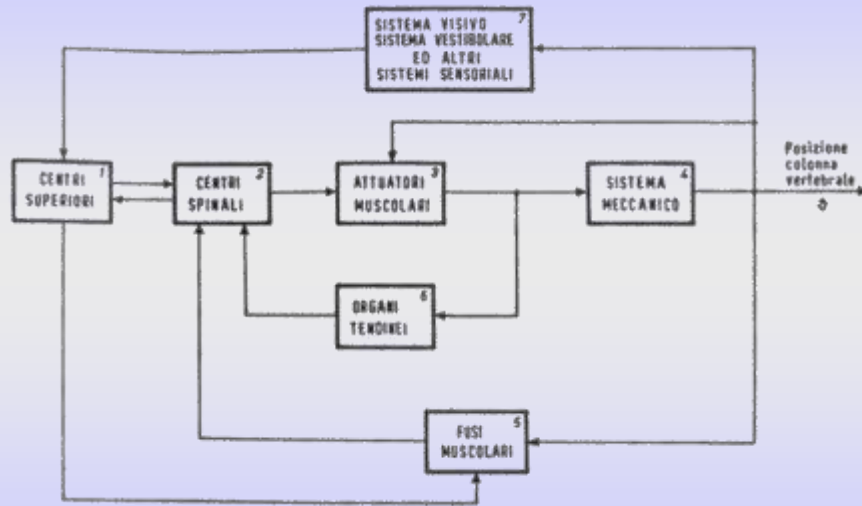
CONTROLLO POSTURA

Maria ROMANO – mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG

Bisogna comprendere che l'equilibrio posturale per noi è banale, ma in realtà non è un task semplice, perché richiede il controllo simultaneo di una moltitudine di muscoli, già in condizioni di riposo. Ancor di più in condizioni di disturbo, ad esempio se ci si trova a dover stare in equilibrio su una piattaforma in movimento (es. mezzi di trasporto, attrezzi da allenamento come tapis roulant e le pedane vibranti).

Ovviamente, più difficile è il task posturale (ad esempio equilibrio su una sola gamba, o equilibrio su un supporto mobile), più ampie saranno le oscillazioni, fino ad arrivare potenzialmente alla perdita di equilibrio.

Schema a blocchi funzionale



Maria ROMANO – mariar@unicz.it
BIOINGEGNERIA
Corso di Laurea "Ingegneria informatica e biomedica" – DMSC - UMG