

Aspetti cibernetici relativi al controllo e alla regolazione dei processi motori nello sport *

Hein Beulke

H. Beulke

Ingegnere Euratom.

Membro del C. S. & R. F.I.D.A.L.

Introduzione

Allenatori e scienziati dello sport sono continuamente confrontati con un complesso di problemi sempre più complicati che, senza « un approccio mentale cibernetico », rimangono incalcolabili e con ciò ampiamente insolubili.

Nessuna delle numerose scienze sportive può da sola, dalla sua prospettiva, descrivere l'intero complesso dell'attività motoria in modo completo ed esauriente, perché nessuna rende giustizia all'assoluta pretesa di dover considerare il sistema motorio come un tutt'uno indissezionabile. L'importanza e il significato delle informazioni specifiche tratte dalle diverse scienze sportive non vengono assolutamente messi in dubbio da questa asserzione. Tutte le informazioni ed il loro significato devono, però, essere interpretati considerando la funzionalità dell'intero sistema come un tutt'uno per poter essere utilizzabili nella pratica sportiva.

Questo è possibile soltanto tramite una unificazione dei modi di vedere e di presentare le informazioni. Soltanto la cibernetica descrive le relazioni funzionali in ogni tipo di sistema basandosi sul complesso flusso di informazioni nell'interno del sistema stesso. Il flusso di informazioni può basarsi su diversi mezzi portanti di informazioni, che possono essere di natura meccanica, ottica, biochimica, ecc.

* Tratto da Leistungssport, 3/1980, pp. 171-189, per gentile concessione.

Il mezzo portante entra in gioco soltanto nelle equazioni di dimensione dei segnali di entrata e di uscita di singoli elementi del sistema o dell'intero sistema.

La descrizione cibernetica dei sistemi complessi conosce tre forme basilari di espressione:

1. la descrizione verbale
2. la esposizione logica-matematica e
3. il concetto modello.

Se l'impenetrabilità di ampie parti del sistema per il controllo e la regolazione dei processi motori sportivi esclude una esposizione matematica, come metodo possibile per la sua descrizione rimane soltanto la combinazione della descrizione verbale e del concetto modello.

Per questo vengono utilizzati ed applicati i principi generali della logica, principi scientifici di valore generale (per es. il principio di conservazione dell'energia, della materia e dell'informazione) e l'esperienza con sistemi confrontabili (conclusioni per analogia) come anche conoscenze sicure di parti del sistema da descrivere.

Per la descrizione del sistema per il controllo e la regolazione dei movimenti è inevitabile servirsi ogni tanto di semplificazioni e raffigurazioni ipotetiche. Dal punto di vista delle esperienze fatte in altri campi scientifico-tecnici questo metodo è del tutto accettabile e non da scartare a priori come « non scientifico ». Anche la biologia e la psicologia, per esempio, preferiscono accontentarsi di approssimazioni piuttosto che rinunciare completamente a certe affermazioni. Anche qui ci sono troppe incognite e componenti stocastiche, cioè probabilistiche, per poter esaminare tutti i problemi secondo un concetto « scientificamente puro ».

Proprio nello sport non possiamo permetterci di trascurare e di ignorare i complessi poco chiari e finora non esplorati con certezza scientifica, che sono però di grande importanza per l'allenamento degli atleti, soprattutto ad alto livello. Dobbiamo almeno esaurire tutte le possibilità per arrivare ad una migliore conoscenza delle *relazioni funzionali*, anche se certe funzioni e dettagli biochimici e biofisici rimangono per il

momento trascurati. Le effettive necessità della pratica dell'allenamento impongono in modo categorico di dare all'allenatore tutto l'aiuto possibile per riconoscere ed utilizzare le regole *funzionali* durante il processo di allenamento, allo scopo di restringere quanto più possibile il « margine di errore ».

A) Alcune considerazioni cibernetiche basilari

Contrariamente al considerevole approfondimento delle conoscenze circa i diversi tipi di forma della forza muscolare e circa la loro allenabilità sussistono idee ancora molto discordanti e molto incerte relative alle correlazioni fondamentali tra le funzioni neuromotorie che controllano e coordinano i processi motori. Le relative scienze hanno infatti una conoscenza abbastanza sicura dei sistemi di controllo umorali e delle loro funzioni, ma per quanto riguarda i sistemi di controllo neurofisiologici e la loro organizzazione si trovano ancora di fronte a molti problemi.

Questi consistono in parte nel fatto che, nella mostruosa complessità del sistema per il controllo e la regolazione dei processi motori, è praticamente impossibile dedurre *tutte* le funzioni di controllo e di regolazione e i rapporti correlativi esclusivamente dalle singole funzioni degli elementi della struttura biologica del sistema. La struttura biologica è — inoltre — caratterizzata da una ampia sezionabilità dei singoli elementi e parti, che induce all'errore di vedere e di valutare i singoli elementi e circuiti di controllo e di regolazione del movimento isolati anche in rapporto alle loro funzioni sistematiche.

Le relazioni funzionali all'interno del sistema per il controllo del movimento si possono riconoscere ed interpretare solo nel quadro della sua struttura funzionale. E in essa sono impensabili azioni isolate di singoli elementi o sotto-sistemi.

Ogni processo di eccitazione e/o di inibizione neurofisiologica in uno degli elementi e sotto-sistemi ha come conseguenza una pluralità di processi di eccitazione e di inibizione correlativi in mol-

te — o addirittura in tutte — le parti e centri dell'intero sistema.

La portata di questa constatazione per la pratica dell'allenamento non deve essere sottovalutata. Da essa deriva, tra l'altro, che anche un allenamento orientato verso uno scopo specifico provoca sempre degli effetti correlativi in altre parti del sistema.

Anche se la parte centrale della struttura funzionale per il controllo del movimento è ancora ampiamente sconosciuta, tante caratteristiche della parte periferica sono già chiarificate in modo piuttosto sicuro. Ciò vale tanto per gran parte delle caratteristiche delle uscite neuromotorie e biomeccaniche del sistema, quanto per il campo delle entrate sensoriali. Questo rende tuttavia possibili alcune valutazioni interessanti, anche se per il momento ancora assai globali sotto l'aspetto della cibernetica generale, che però possono contribuire ad una spiegazione più che altro ipotetica di molti *rapporti funzionali interni*.

Il sistema per il controllo e la coordinazione del movimento è un sistema dinamico, auto-organizzante, di adattamento, che consiste in molti sottosistemi connessi tra di loro tramite una *struttura informativa* straordinariamente complessa. I rapporti entrate-uscite del sistema sono già abbastanza prevedibili, ma le conoscenze circa le loro funzioni interne sono ancora molto incomplete. La descrizione delle funzioni, di conseguenza, ha senso solo applicando la « Black Box Theory » di Ashby.

La rappresentazione di sistemi complessi con l'applicazione di questa teoria è tipica nella cibernetica. Il contenuto di una « black box » rimane anonimo, mentre dai rapporti entrata-uscita possono essere tratte delle conclusioni sulle *caratteristiche funzionali* del contenuto senza dover conoscere o perfino risolvere la forma o struttura originaria interna della « black box ».

Bisogna però tenere sempre presente che medesime funzioni interne conducono sempre a medesime funzioni esterne, mentre medesime funzioni esterne possono anche essere ottenute in sistemi tipo « black box » da funzioni interne diverse.

Tutte le conclusioni circa le funzioni interne possono essere perciò solo di natura ipotetica. Ad ogni modo l'ipotesi non si può rifiutare fintanto che la sua validità non possa essere confutata da altri metodi più attendibili.

Nella teoria dell'allenamento non possiamo permetterci di rinunciare a modelli ipotetici per il funzionamento dei sistemi di controllo per la coordinazione del movimento, se non vogliamo rinunciare a priori alle *cognizioni funzionali* che possono anche essere di grande importanza per la pratica dell'allenamento.

Il concetto modello, essendo uno dei metodi per raffigurare più chiaramente le complesse relazioni funzionali, riunisce sempre in sé un concetto analitico (per es. del biologo) e uno sintetico (per es. del tecnico). Per la pratica dell'allenamento essa può diventare molto più utile della spiegazione puramente verbale o matematica (finquando quest'ultima è possibile) per una comprensione migliore di correlazioni complicate, per esempio nell'addestramento tecnico.

Dal concetto modello risulta generalmente uno schema complesso di « black box » dal quale deriva l'azione d'insieme dei singoli sistemi « black box » all'interno del sistema. Diventa chiaro quali unità di funzioni siano determinanti per un certo processo e per il suo svolgimento e in quali correlazioni funzionali esse si trovano tra di loro.

Lo schema complesso di « black box » deve fornire almeno una idea quantitativa fondamentalmente giusta dei processi rappresentati. Non deve essere però molto dettagliato. Non è necessario che in esso si spieghino dettagli biofisici o biochimici, a meno che ciò non sia indispensabile per la descrizione della *funzione* del sistema o di singoli elementi.

La chiarificazione e la spiegazione del contenuto biofisico e biochimico degli elementi del sistema possono essere soltanto compito delle relative scienze.

B) L'organizzazione dei circuiti di controllo e regolazione neuromotori

1. Il principio d'ordine gerarchico

Un principio sempre ricorrente nell'organizzazione di circuiti di regolazio-

ne organici è la loro suddivisione in istanze (livelli) di controllo disposte gerarchicamente l'una sull'altra. Tra di loro esse sono vincolate in modo straordinariamente complicato.

Se si rappresenta schematicamente un tale principio di organizzazione (Fig. 1) si riconoscono le svariate possibilità di combinazione dei diversi centri di controllo e regolazione che si ricavano dalla complessa rete delle linee che rappresentano il flusso informativo. Risulta chiaro che la retroazione — il feedback — dei segnali non deve affatto seguire necessariamente o esclusivamente sul livello dei segnali di controllo. Il feedback dei centri inferiori può essere assunto da centri di ordine più alto, ma può anche avvenire il contrario. Si possono immaginare senz'altro anche collegamenti feedback in parallelo su diversi livelli.

Dalla rappresentazione ipotetica del principio di organizzazione si possono dedurre le possibilità funzionali fondamentali del sistema. Sarebbe sbagliato, però, voler vedere in esso uno schema di ordine classificativo generale. Con ciò si rischierebbe di incappare in contraddizioni perché:

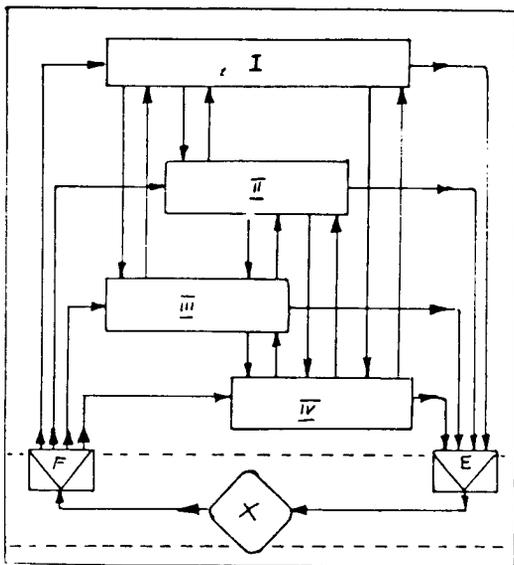


Fig. 1 - Il principio dell'ordine gerarchico e delle interconnessioni dei circuiti organici di regolazione e controllo.

— circuiti organici di regolazione non si possono quasi mai delimitare chiaramente, perché la loro funzione deriva in generale dall'azione d'insieme di più istanze di uguale o diverso livello gerarchico,

— il numero dei circuiti di regolazione che partecipano al controllo di un movimento generalmente è molto grande, e il modo in cui essi compiono la loro azione di insieme deriva ogni volta dalle specifiche necessità del movimento (confr. anche Fig. 2),

— tutte le suddivisioni e raffigurazioni possibili devono perciò essere considerate arbitrarie. Nonostante ciò, esse possono avere senso se portano ad una migliore comprensione di determinate funzioni. Però sempre a condizione che esse tengano in considerazione o almeno non contraddicano il tutt'uno funzionale dell'organismo e i suoi sottosistemi.

2. Capacità di memoria, rapidità di reazione, inraeffetto

I centri di controllo e di regolazione di ordine superiore e inferiore si differenziano fundamentalmente per diverse capacità di memorizzazione e diversa rapidità di reazione.

I centri di ordine superiore sono in generale più lenti ma dispongono di una maggiore capacità di memorizzazione rispetto ai centri di ordine inferiore. L'andamento di movimenti più complicati è controllato da loro più lentamente ma in modo molto più sicuro. Le possibilità di variazione del controllo sono qui molto grandi. L'elaborazione delle informazioni in questi centri, che a seconda del loro stato gerarchico di ordine sono raggiungibili direttamente o indirettamente dalla coscienza, avviene in modo sicuro e la memorizzazione delle informazioni è molto stabile.

I centri inferiori reagiscono in modo più veloce e controllano il complesso di insieme dei riflessi e dei movimenti automatizzati. La loro capacità di memoria è però limitata e la variabilità delle loro funzioni è circoscritta.

A seconda del tipo, della complessità e del grado di automatizzazione dei processi motori variano i modi del collega-

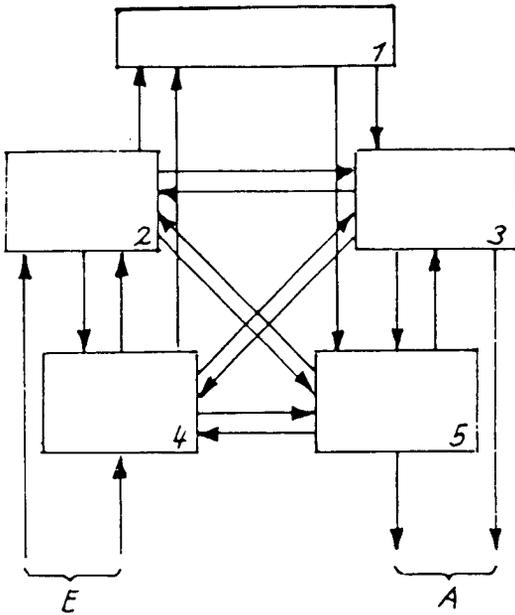


Fig. 2 - Schema complesso di « black box » riassuntivo ed ipotetico del flusso di dati tra organi di senso, coscienza e muscoli. 1=coscienza, 2, 4=due centri afferenti di elaborazione a livelli diversi. 3, 5=due centri efferenti a livelli diversi. E=entrate sensoriali. A=uscite verso gli effettori. Ciascuno dei blocchi da 2 a 5 sta al posto di un gran numero di centri, ugualmente E ed A. Si osservi la possibilità basilare (certamente sfruttata solo in parte in natura) di qualsiasi collegamento reciproco tra i singoli centri (secondo Erismann).

mento d'insieme tra le istanze di controllo e regolazione, la distribuzione dell'importanza dei loro compiti e « l'intraeffetto » dei centri superiori nella periferia del sistema motorio.

Così, per esempio, l'intraeffetto di questi centri nello svolgimento di processi motori non automatizzati è molto grande ma mai totale, perché quasi tutti i processi motori non automatizzati comprendono già elementi di movimento più o meno automatizzati.

Nei processi motori automatizzati l'intraeffetto dei centri coscienti o vicini alla coscienza è minimo, però mai nullo. Si conserva sempre — già come funzione protettiva biologica — un minimo di possibilità di intervento nello svolgimento del movimento. Questa possibilità di intervento nello svolgimento di un atto motorio automatizzato (stereotipo) si accresce chiaramente con

l'esperienza motoria dell'atleta. Questo argomento verrà ripreso nel quadro di una ipotesi relativa al processo di apprendimento motorio nell'ultimo capitolo di questo saggio.

3. *Variazioni dello stato d'ordine gerarchico*

Lo stato d'ordine di molti centri non è predeterminato per tutti i tempi mediante un rigido schema strutturale. Nel corso dell'esistenza dell'organismo possono risultare variazioni dello stato di ordine determinate essenzialmente da variazioni delle condizioni e degli scopi dei processi motori. Esso può consistere in riduzioni delle funzioni di sistemi di ordine superiore, trasformati parzialmente in sistemi inferiori. Il compito del sistema superiore viene così alleggerito e la sicurezza della sua funzione migliorata. Si pensi soltanto alla differenza tra il guidare l'automobile come principianti e dopo molta esperienza. Anche l'automatizzazione di movimenti sportivi mediante processi di apprendimento motorio corrisponde senza dubbio ad una variazione dei livelli di controllo di questo tipo.

Secondo Ljapunov si può però immaginare lo sviluppo di livelli più alti di controllo. Questo sviluppo può essere determinato sia strutturalmente sia statisticamente. Lo sviluppo strutturale di un livello più alto avviene con la formazione di un nuovo sistema da elementi che sono già sistemi di ordine inferiore. In questi casi « la velocità di reazione determinata dagli organi esecutori del sistema di ordine inferiore non viene modificata »! (Ljapunov). Lo sviluppo statistico di un livello di controllo più alto è invece determinato, secondo le regole della probabilità, da interazioni tra molti sistemi di ordine inferiore statisticamente equiparati e indipendenti l'uno dall'altro.

4. *La struttura funzionale secondo l'ordine gerarchico dei sistemi di controllo e di regolazione*

Anche se ogni rappresentazione classificatoria di uno schema strutturale dei centri neuromotori di controllo e regolazione può facilmente condurre a contradd-

dizioni, vista la molteplicità dei centri interessati, delle loro interconnessioni, e la difficile limitazione dei loro effettivi campi di funzione, presentiamo qui brevemente i centri più importanti e i collegamenti tra di loro. La loro organizzazione in cinque livelli gerarchici, mostrata nella Fig. 3, può almeno fornire una certa idea relativa alle azioni funzionali del loro insieme.

Gawronski vede nel suo schema strutturale cinque livelli:

- I - la corteccia come centro più elevato di coordinazione e di decisione;
- II - un gruppo di centri subcorticali che prendono parte al coordinamento dei programmi di movimento e della formazione degli stereotipi;
- III - un gruppo di centri soprasspinali che, secondo l'opinione generale, costituiscono un sistema coordinativo e correttivo;
- IV - un segmento di midollo spinale che prende parte al coordinamento dell'attività muscolare;
- V - i circuiti periferici di regolazione per il controllo dell'attività muscolare a livello periferico-spinale.

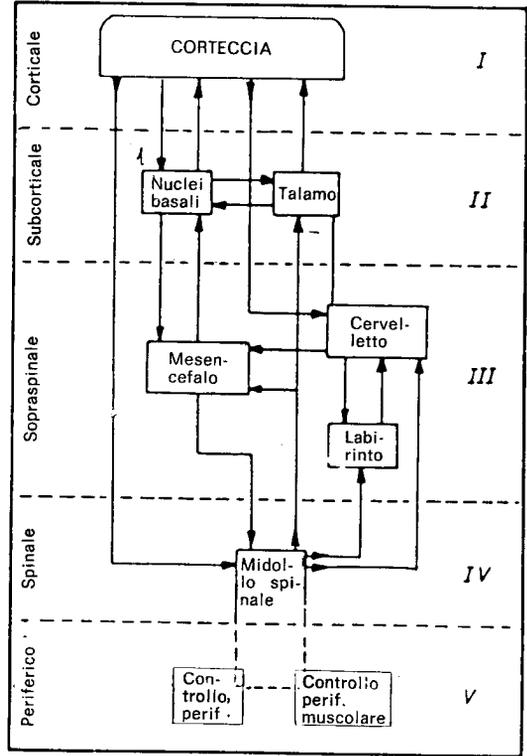


Fig. 3 - Schema strutturale dei circuiti di regolazione per il controllo del movimento (secondo Gawronski).

5. Circuiti di regolazione e controllo interni ed esterni

Le attività motorie devono sempre tenere conto delle condizioni stabili e variabili dell'ambiente in cui esse avvengono. Per il controllo e la regolazione del movimento si distingue perciò, a se-

conda del tipo di retroazione (feedback) delle informazioni, tra circuiti di regolazione interni ed esterni (Fig. 4).

Il concetto di sistemi interni dei circuiti di regolazione comprende tutti i circuiti di regolazione organici con un processo di informazione che si svolge

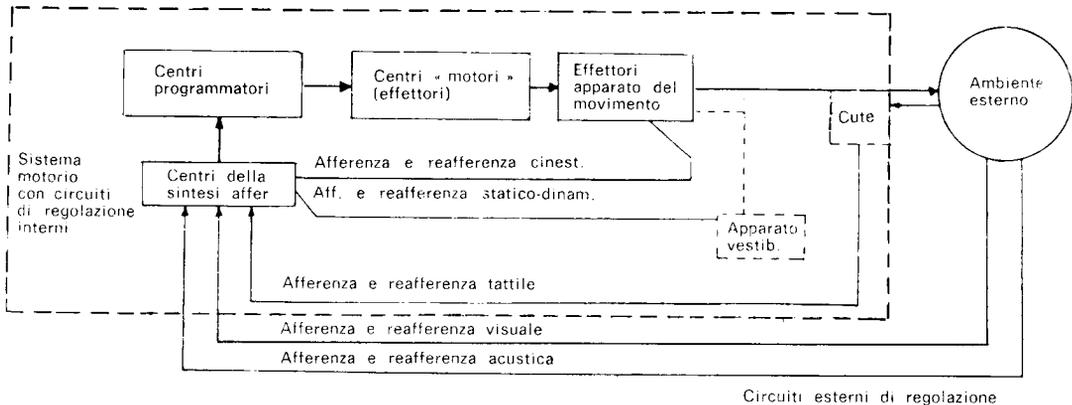


Fig. 4 - Sistema motorio con circuiti di regolazione interni ed esterne (secondo Schnabel).

esclusivamente all'interno dell'organismo. In esso rientrano tutti i circuiti di regolazione per il controllo del movimento che ricevono i loro segnali retroattivi dai sensori cinestetici e statico-dinamici, quindi dai propriorecettori e dall'apparato vestibolare. I segnali retroattivi dei sistemi esterni dei circuiti di regolazione passano, al contrario, anche nel mondo esterno e vengono captati essenzialmente dai sensori degli organi di senso per l'orientamento nello spazio (principalmente occhio e orecchio).

Al controllo e alla regolazione di ogni movimento volontario partecipano sempre entrambi i sistemi dei circuiti di regolazione, anche se con una distribuzione del loro impiego che varia da caso a caso.

6. *Definizione dei movimenti automatici e volontari*

Per automatici si intendono quei movimenti sulla cui origine e sul cui svolgimento i centri superiori non hanno alcun influsso, o su cui non possono esercitare coscientemente la loro azione. Tutte le attività muscolari controllate tramite i circuiti di regolazione omeostatici sono movimenti automatici. Di essi fa parte anche la respirazione, sebbene essa, entro certi limiti, possa essere variata coscientemente.

Per motivi pratici definiamo in questo saggio come movimenti volontari tutti i movimenti che non sono componenti delle funzioni vegetative dell'organismo. Di essi fanno parte tutti i movimenti che risultano da un'attività muscolare sinergica che devono risolvere un compito di movimento voluto. Il grado di automatizzazione raggiunto mediante relativi processi di apprendimento motori non viene considerato in questa definizione.

C) **Circa il flusso di informazioni nel sistema neuromotorio**

La lettura di saggi specializzati sul coordinamento dei movimenti sportivi crea difficoltà non soltanto all'allenatore, per il fatto che vengono considerati conosciuti dal lettore anche i concetti che provengono da un campo puramen-

te tecnico, ma che sono di importanza fondamentale per la comprensione delle caratteristiche di trasmissione dei segnali e la funzione degli elementi del sistema neuromotorio. In questo capitolo cercheremo di spiegare almeno i concetti più essenziali e più importanti in una forma più semplice possibile.

1. *Tipo e codifica dei segnali nervosi*

Tutti i nervi che corrono al di fuori del sistema nervoso centrale (SNC) trasmettono un unico tipo di segnali: brevi impulsi elettrici con una altezza di impulso approssimativamente costante ed una frequenza di successione (numero degli impulsi per unità di tempo) che varia a seconda del contenuto delle informazioni. In genere questi impulsi (potenziali di azione) hanno una durata di circa 1 millisecondo. L'intervallo minimo tra gli impulsi è determinato da una breve non-eccitabilità delle cellule nervose immediatamente dopo un potenziale d'azione, il cosiddetto periodo refrattario, che dura soltanto frazioni di millisecondi. Il cervello può distinguere tra i segnali che arrivano dai diversi organi di senso (di vista, udito, tatto, gusto e olfatto) solo perché tutti gli organi di senso utilizzano linee nervose (assomi) separate per la trasmissione dei segnali. Il cervello fa distinzione quindi tra i diversi « canali di entrata ». Si dovrebbe così, se fosse possibile scambiare per esempio i nervi della vista e dell'udito, « poter sentire il lampo e vedere il tuono » (Du Bois Raymond).

Sulle linee nervose non viene — dunque — comunicato di che origine sia l'informazione trasmessa. La singola fibra nervosa trasmette l'informazione solo se gli stimoli raggiungono i sensori interessati, e a seconda dell'intensità di questi stimoli. L'intensità degli stimoli si manifesta nel numero dei potenziali di azione per unità di tempo, dunque nella loro frequenza. Questo modo di modulare la « portante » delle informazioni con il contenuto informativo viene chiamato modulazione della frequenza di impulso (PFM).

La ragione per utilizzare proprio questo tipo di modulazione non è casuale. Ciò si vede nel modo migliore facendo

il confronto con altri tipi di modulazione possibili e usuali nella tecnica (Fig. 6).

Oltre alle tre possibilità di modulazione di un segnale scomposto in impulsi

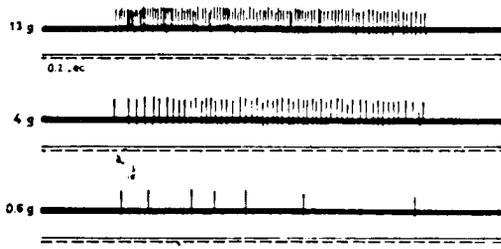


Fig. 5 - Potenziali d'azione nervosi devianti dalla fibra nervosa di una cellula nervosa della cute umana reagente ad una pressione. La frequenza varia con le variazioni di pressione (g=grammi). Durata da sinistra a destra: 6 sec. I potenziali d'azione sono stati registrati elettricamente su un soggetto in stato cosciente. Da Hensel e Boman, J. of Neurophysiology, 23, 564-587, 1960.

(1, 2 e 3 nella Fig. 6) si conosce la modulazione di ampiezza, in cui l'informazione viene trasmessa come segnale continuo analogo alla intensità degli stimoli e al loro andamento nel tempo.

Con due tipi di modulazione si potrebbe in linea di massima trasmettere una quantità più grande di informazioni per unità di tempo (2 e 4 nella Fig. 6), perché già dal primo segno e senza indugio si potrebbe riconoscere di volta in volta l'intensità attuale degli stimoli, mentre nella modulazione della frequenza di impulso si può riconoscere l'intensità dello stimolo al più presto dopo almeno due impulsi, cioè dall'intervallo tra di loro. Proprio nel caso di bassa intensità di stimolo (intervallo più lungo di impulso = bassa frequenza di impulso) la capacità di trasmissione in confronto alla modulazione dell'ampiezza o dell'altezza di impulso, per esempio, è decisamente inferiore.

Il motivo per cui la natura ha preferito questo codice sta certamente nel fatto che la modulazione della frequenza di impulso è un codice di trasmissione molto sicuro e protetto contro ogni tipo di interferenze. Questo si evidenzia nel principio della propagazione dei segnali lungo le linee nervose. Questa propagazione dei segnali consiste nel trasferimento dei potenziali di azione

da un punto eccitabile della fibra nervosa al seguente. Il potenziale d'azione in arrivo deve soltanto provocare la generazione di un nuovo potenziale d'azione con le stesse caratteristiche. L'ampiezza del potenziale d'azione rigenerato non dipende in alcun modo dal potenziale d'azione in arrivo. I punti eccitabili (Nodi di Ranvier) si trovano sulle fibre nervose afferenti a circa 1 mm di distanza l'uno dall'altro.

La precisione con cui il potenziale d'azione nervosa in ogni nodo di Ranvier viene riprodotto è pertanto di secondaria importanza.

L'errore di riproduzione è in genere dell'ordine di qualche per cento o meno per quanto concerne l'ampiezza e la durata.

In un codice come quello della modulazione dell'ampiezza dell'impulso, per esempio, un errore di riproduzione di questo ordine di grandezza o perfino molto inferiore diventerebbe fatale per la trasmissione delle informazioni. Un errore di riproduzione dell'1%, per esempio, sul percorso da un dito al cervello, ripetendosi sempre nello stesso senso in circa 800 nodi di Ranvier, porterebbe ad una falsificazione dell'informazione (dell'altezza dell'impulso) del fattore $1,01^{800} = 2864$. Anche in una distribuzione statistica dell'errore dell'1% sarebbe assolutamente impossibile prevedere quale segnale alla fine arriverebbe al cervello.

Si può dire che il flusso di informazioni lungo le linee nervose si svolge con un « codice protetto ». I segnali, cioè i potenziali d'azione, si basano sul-

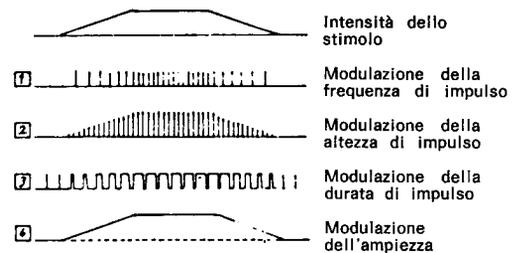


Fig. 6 - Sopra: decorso temporale dell'intensità di uno stimolo: prima in aumento, poi stazionario, poi decrescente. Sotto: riproduzione di queste variazioni di intensità con l'aiuto di 4 codici diversi (secondo Hassenstein).

l'alternativa *segnale o non segnale* (la legge del tutto o nulla). Le cellule sensoriali trasformano il loro stato di stimolo in tali segnali. Tutte le eventuali correzioni non avvengono soltanto dal lato del ricevitore (il cervello) ma praticamente in ogni singolo punto in cui il segnale viene ricevuto e nuovamente generato, cioè nei nodi di Ranvier. Qualunque disturbo, fintanto che non interrompe l'intero processo di propagazione del segnale, rimane così senza alcun effetto sulla trasmissione delle informazioni.

Oltre alle linee nervose come mezzo per la trasmissione delle informazioni dobbiamo considerare anche gli ormoni come « mezzi portanti » di informazioni. La loro influenza è di grande importanza sul lato efferente del controllo e può influenzare il controllo neuromotorio del movimento in misura notevole.

A differenza della trasmissione di informazioni nel sistema nervoso (solo un « destinatario » dal lato efferente), gli ormoni si riversano nella circolazione sanguigna come informazioni « per tutti », perché il sangue raggiunge tutte le cellule viventi del corpo, anche se non tutti gli ormoni hanno effetto su tutte le cellule. In confronto alla velocità di trasmissione del segnale nervoso (fino a circa 120 m/sec.) e al suo effetto quasi immediato abbiamo però una velocità di propagazione tramite gli ormoni di al massimo 0,6 m/sec., e anche l'effetto non è proprio immediato. Il suo effetto però dura molto a lungo; come minimo minuti, se non addirittura ore o giorni. Gli ormoni di solito vengono o distrutti chimicamente passando per il fegato o eliminati dall'organismo in altri modi.

2 Circa le caratteristiche di trasferimento degli elementi di controllo e dei circuiti di regolazione

Le caratteristiche funzionali di un sistema di controllo sono stabilite tramite i dati caratteristici statici e dinamici dei suoi elementi funzionali. Sotto l'aspetto cibernetico tutti i dati caratteristici si riferiscono alle capacità degli elementi di trasferire e di elaborare informazioni. Esse possono essere rappresentate in base a parametri che descrivono i com-

plici rapporti entrata/uscita scomposti nei loro diversi componenti.

a) Curve caratteristiche delle cellule sensoriali

Per poter considerare i dati caratteristici importanti e il « punto di lavoro », il campo di lavoro e la sensibilità (amplificazione) di un elemento per la trasmissione delle informazioni, e contemporaneamente l'eventuale cambiamento di forma della portante di energia (risultante dalle equazioni di dimensione dei valori sulle scale x e y) ci si serve nella tecnica della rappresentazione tramite curve caratteristiche (Fig. 7). Se noi le

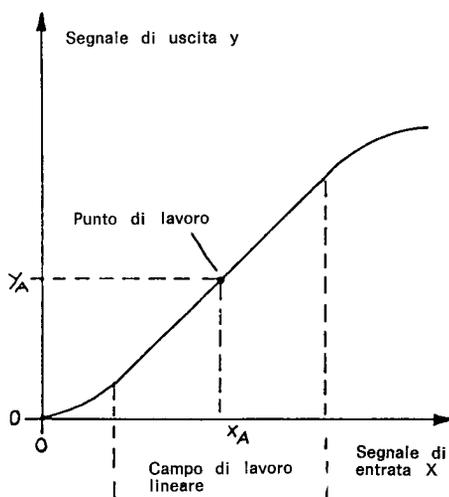


Fig. 7 - Curve caratteristiche di un sistema di trasmissione.

assumiamo nel campo biologico e le consideriamo come caratteristiche di trasferimento tramite una cellula sensoriale, il segnale di entrata x , per esempio, può essere il potenziale analogo-continuo del recettore, mentre il segnale di uscita y presenta una forma completamente diversa, vale a dire quella della frequenza di potenziali di azione nervosa (vedere Fig. 8).

Il « punto di lavoro » delle cellule sensoriali si trova generalmente nel mezzo di una parte rettilinea della sua curva caratteristica. Ciò porta al massimo campo di lavoro lineare possibile. Con segnali di entrata troppo grandi la cel-

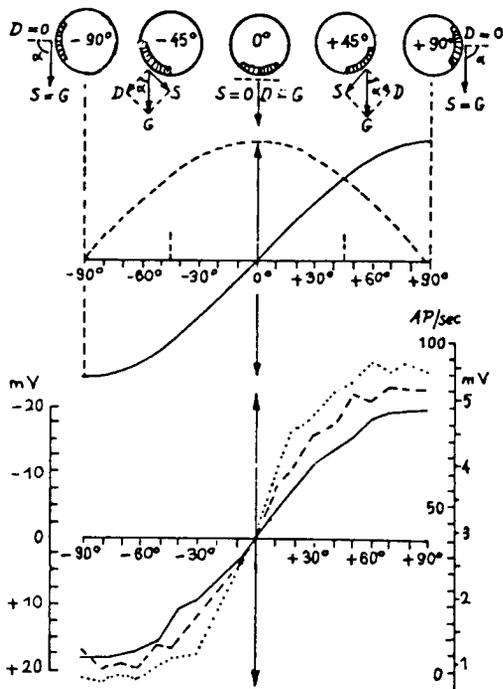


Fig. 8 - Curve caratteristiche dei recettori dell'apparato statolitico (secondo Trincker).

Nota esplicativa della Fig. 8: sopra sono mostrate come parallelogrammi vettori (G =forza di gravità, S =forza tagliante e D =pressione e depressione) l'inclinazione della testa nello stato di equilibrio (0°) dai due lati, fino a 90° ciascuno, e le forze che agiscono sull'epitelio sensoriale. Il diagramma sotto di essa mostra la relazione tra la forza tagliante (curva continua, funzione seno) e la componente di pressione e depressione (curva tratteggiata, funzione coseno) conseguente all'angolo di inclinazione della testa.

Il diagramma sottostante mostra la curva del potenziale delle cellule sensoriali come funzione dell'inclinazione della testa come curva continua (scala delle ordinate a sinistra), la corrispondente frequenza del potenziale di azione sulla singola fibra nervosa come curva tratteggiata (scala delle ordinate a destra, interno), e il potenziale dell'azione cumulativa di tutto il nervo utricolare come curva punteggiata (scala delle ordinate a destra, esterno).

lula viene sovraccaricata, cioè condotta fino nel campo non lineare della curva caratteristica. Con ciò non è più dato il rapporto proporzionale tra uscita ed entrata. Tanti tipi di cellule sensoriali evitano questo sovraccarico mediante un comportamento adattivo (vedere sezione b di questo capitolo), variando

cioè la propria sensibilità (l'amplificazione).

La sensibilità (l'amplificazione) di una cellula sensoriale è data dal quoziente differenziale variazione dei valori di uscita/variazione dei valori di entrata ($\Delta y/\Delta x$), dunque nella raffigurazione grafica rappresentata dall'inclinazione della curva caratteristica.

La maggior parte delle cellule sensoriali ha il suo « punto di lavoro » nel mezzo della parte più ripida della curva caratteristica. Così è garantita contemporaneamente la sensibilità (amplificazione) ottimale e inoltre l'indicazione direzionale del segnale di entrata (per es. pressione e depressione). Ciò è rappresentato nella Fig. 8 molto chiaramente tramite l'esempio delle curve caratteristiche del recettore dell'apparato statolitico dell'organo vestibolare.

b) Rappresentazione del comportamento temporale mediante la « funzione di trasferimento »

La curva caratteristica di un sistema di trasferimento non dice ancora nulla sul suo comportamento temporale. Questa caratteristica importante per ogni processo di controllo e di regolazione viene descritta mediante la cosiddetta « funzione di trasferimento ». Essa si può raffigurare tramite il comportamento del segnale di uscita di un elemento di trasferimento in conseguenza di una variazione immediata del segnale di entrata. Nella Fig. 9 sono mostrate le tre possibilità fondamentali delle funzioni di trasferimento: il comportamento proporzionale (P), differenziale (D) e integrale (I) e l'importantissima funzione di trasferimento che risulta dalla combinazione del comportamento proporzionale e differenziale (PD), che è di particolare importanza nei sistemi di controllo e di regolazione del processo motorio. A sinistra è rappresentata la funzione di trasferimento ideale, il cui *effettivo* andamento (a seconda del carattere di fase dell'impedenza di entrata, dei tempi di reazione e così via) può apparire all'uscita nella forma rappresentata a destra più o meno fortemente deformato e rallentato.

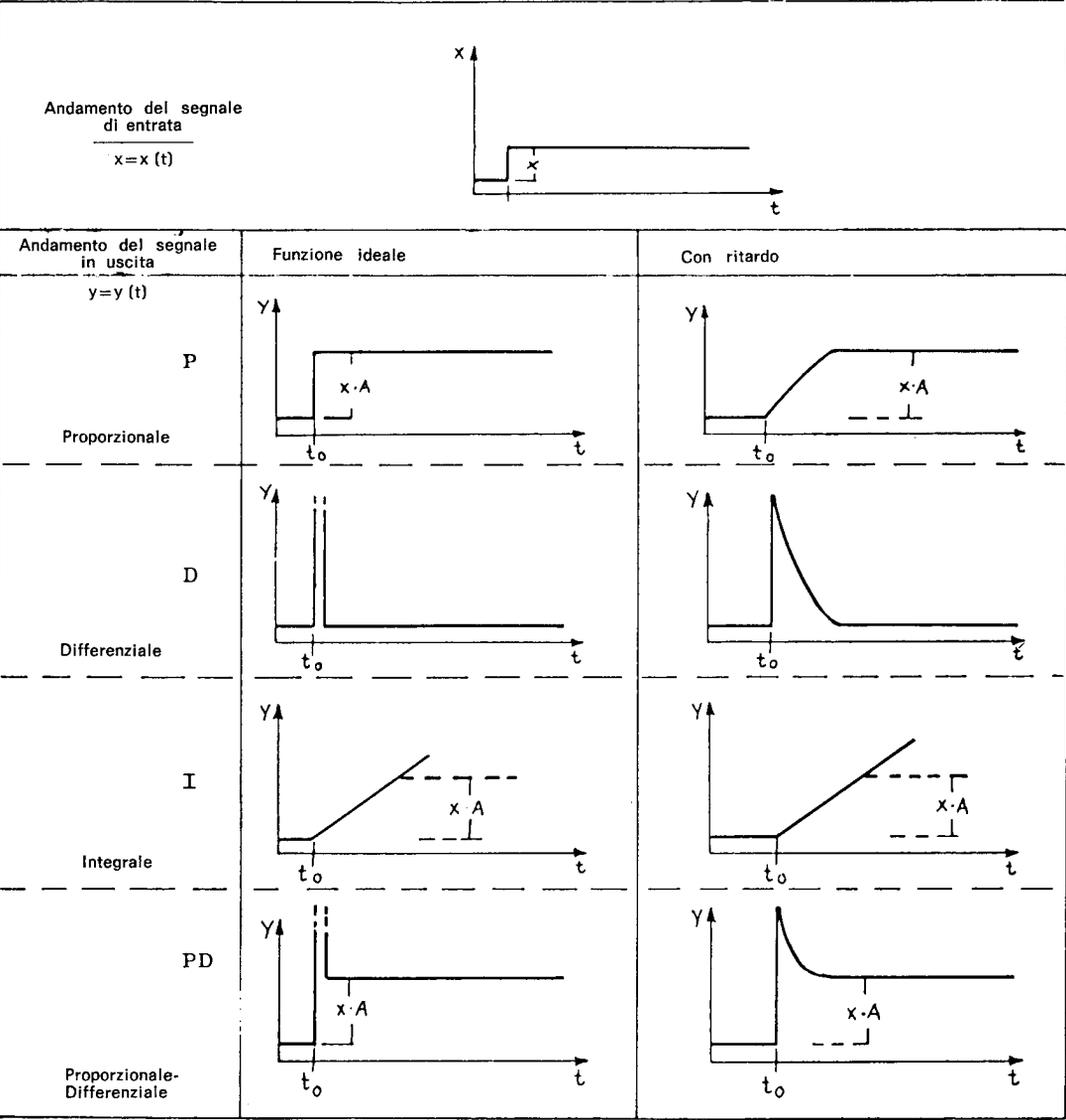


Fig. 9 - Funzione di trasferimento: decorso temporale del segnale di uscita di un elemento di trasmissione durante una variazione istantanea del segnale di entrata (A=amplificazione del segnale nell'elemento di trasmissione).

Nei recettori dell'organismo umano troviamo prevalentemente funzioni di trasferimento di carattere proporzionale-differenziale. La misurazione e la trasmissione degli stimoli (comportamento proporzionale) si uniscono con una reazione rapida e di alta sensibilità della cellula sensoriale alle variazioni degli stimoli (comportamento differenziale). La funzione di trasferimento proporzionale-differenziale è tra l'altro di im-

portanza significativa nel complesso controllo dei riflessi sul livello neuromotorio inferiore. Nei recettori di questo campo il comportamento differenziale è decisivo per il controllo dei riflessi, mentre il comportamento proporzionale diventa attivo specialmente nel campo della refferenza cinestetica. Un comportamento proporzionale puro si trova, in realtà, soltanto nel trasferimento dei segnali del sistema vesti-

bolare. Qui, fino al livello del mesencefalo, non c'è alcuna differenza fondamentale tra l'andamento temporale dello stimolo e la risposta allo stimolo. Le curve caratteristiche statiche e dinamiche degli elementi di trasferimento dell'apparato vestibolare sono perciò quasi identiche e non c'è quasi alcun adattamento allo stimolo. Nel sistema per l'orientamento spaziale il comportamento proporzionale è particolarmente importante, perché l'orientamento spaziale non deve dipendere dal tempo, se esso deve adempiere al suo senso biologico.

Un adattamento veloce agli stimoli di entrata lo troviamo nei recettori dell'occhio e del canale uditivo. In caso estremo, questi recettori reagiscono quasi esclusivamente a variazioni di stimolo, mostrando così un comportamento differenziale pressoché puro. Nel complesso compito del senso della vista, diventa particolarmente evidente la necessità di una « adattività ». L'aspetto del mondo esteriore deve rimanere quanto più possibile indipendente dalla situazione, dalla sensibilità e dai cambiamenti temporali delle caratteristiche dell'organo di senso, anche se il livello dello stimolo, la situazione dell'immagine e la sua intensità luminosa sulla retina variano e anche il suo contenuto continuamente e spesso molto rapidamente. Perfino inciampando o cadendo rimane la necessità di una sicura e costante impressione sensoriale. Senza meccanismi e sistemi adattativi di controllo e regolazione assai veloci non possono, in questi casi, essere tratte dall'ambiente informazioni sufficienti, né essere poi elaborate e da esse ricavati programmi motori di reazione e/o di correzione; i riflessi da soli non bastano a questo scopo.

Contrariamente ai recettori, in cui, condizionato dal loro compito come sensori e convertitori e/o trasmettitori degli stimoli, non si trova alcun comportamento integrale, l'integrazione di informazioni nel sistema nervoso centrale (SNC) è indispensabile. Senza questa è impensabile, tra l'altro, la memorizzazione e di conseguenza anche qualunque processo di apprendimento.

c) Feedback positivo (retroazione positiva) e feedback negativo (retroazione negativa)

Con i metodi descrittivi della cibernetica per la rappresentazione delle relazioni sistematiche è stato accettato anche nel campo dello sport moderno il concetto di « feedback ». Ciò indica giustamente il riflusso e la retroazione di informazioni allo scopo di rendere ottimale la regolazione e il controllo dei processi.

L'opinione assai generale che il feedback abbia fundamentalmente un influsso stabilizzante sulla funzione di un sistema è solo parzialmente giusta.

Correttamente si deve distinguere — invece — tra feedback positivo e feedback negativo, con effetti opposti. Questo si può spiegare facilmente con l'esempio di un qualsiasi circuito di regolazione tecnico (Fig. 10 a e b).

Se in un elemento di trasferimento (amplificante) la fase del segnale di entrata viene invertita (da + a —, da crescente a decrescente, ecc.), il feedback ha un effetto stabilizzante sulla trasmissione nel sistema, perché il segnale di

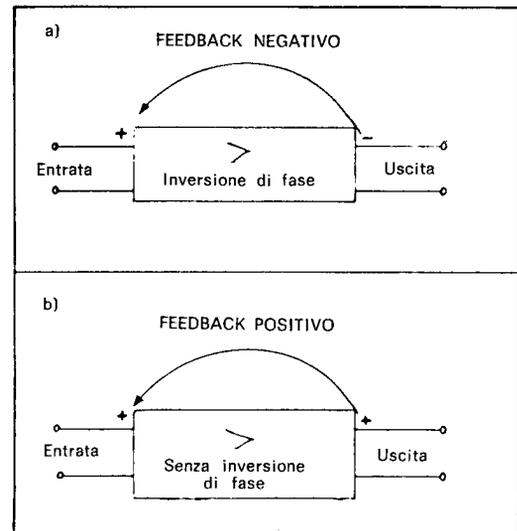


Fig. 10 - a) Feedback negativo: retroazione del segnale di uscita con inversione di fase sull'entrata di un sistema di trasmissione (stabilizzante). b) Feedback positivo: retroazione del segnale di uscita senza inversione di fase all'entrata di un sistema di trasmissione (destabilizzante).

uscita diventa retroattivo sull'entrata del sistema su cui viene ricondotto. Questo è il tipico caso di feedback negativo che impedisce un sovraccarico dell'entrata, e tutto il sistema viene mantenuto in uno stato di funzione stabile. La regolazione delle pupille può valere come esempio di feedback negativo in un circuito organico di regolazione. Questo vale ugualmente per molti circuiti organici di regolazione con caratteristiche adattative. Anche la retroazione dei segnali dei fusi tendinei (Golgi) sulle entrate inibitive dei motoneuroni può essere vista sotto questo aspetto.

Se il segnale di entrata di un elemento di trasferimento non viene invertito in esso e quindi ricondotto come segnale « in fase », abbiamo a che fare con un feedback positivo. Il segnale di uscita ricondotto sull'entrata nella stessa direzione di fase del segnale di entrata destabilizza il comportamento dell'elemento di trasferimento che va in auto-oscillazione. L'elemento non è più adatto per un qualunque trasferimento di segnali.

Esiste comunque la possibilità di un feedback positivo (controllato): si può con mezzi adatti regolare l'elemento o il sistema fino a poco prima delle condizioni di autooscillazione. Questo ha come conseguenza un notevole guadagno di sensibilità (di amplificazione). Si pensi alle radio degli anni trenta.

L'immediata secrezione di adrenalina in seguito ad uno shock o ad un dolore, avente come conseguenza una massima apertura pupillare e con ciò un forte aumento di sensibilità della vista, può essere considerato in effetti come feedback positivo. Anche l'accoppiamento delle entrate eccitanti dei motoneuroni dai recettori dei fusi muscolari corrisponde, in un certo modo, al feedback positivo.

D) Circa il funzionamento dei circuiti di regolazione dei diversi livelli di controllo

1. I circuiti di controllo del livello inferiore

Per una centrale di controllo è impossibile coordinare l'andamento di un mo-

vimento se non arrivano informazioni inequivocabili relative alla posizione dei singoli elementi del corpo nello spazio, alle forze che agiscono su di essi e allo stato di contrazione di tutti i muscoli partecipanti. Queste informazioni vengono per buona parte rilevate tramite i propriorecettori nei fusi muscolari e tendinei e nei meccanorecettori delle articolazioni.

I fusi muscolari, interpretabili come apparati di misurazione per l'allungamento dei muscoli, possiedono nel loro interno un sistema contrattile che può essere controllato tramite le proprie fibre nervose efferenti (γ) dai centri superiori. Così viene praticamente esercitato un controllo sulla funzione dei fusi muscolari, nel senso che una contrazione delle fibre intrafusali dei fusi muscolari porta ad un aumento della sensibilità dei recettori in essi contenuti.

I fusi muscolari rilevano lo stato di contrazione dei muscoli. I segnali corrispondenti al grado della contrazione, prodotti dai loro recettori, vengono ricondotti nei centri superiori come informazione cinestetica da una parte, e dall'altra parte accoppiati alle entrate eccitatorie dei relativi motoneuroni. Ciò equivale ad un « feedback positivo »: i motoneuroni vengono stimolati alla produzione di impulsi che, da parte loro, hanno come conseguenza la contrazione di altre fibre muscolari extrafusali. Oltre alla emissione di segnali in conseguenza di comandi tramite i motoneuroni γ sulle fibre intrafusali, essa può essere influenzata anche da azioni esterne (per es. variazioni del carico). Questo spiega la funzione del circuito di regolazione dei riflessi interni e l'adattamento attivo dei muscoli caricati ad allungamenti passivi aggiuntivi e ad accorciamenti dei muscoli, se il controllo del tono dei centri superiori rimane costante; un fenomeno che per lungo tempo è rimasto oscuro.

Secondo H. Frank i fusi muscolari hanno una funzione importante per il mantenimento del tono contrattile delle fibre muscolari extrafusali. Il periodo refrattatorio delle fibre muscolari striate è sostanzialmente più breve del singolo impulso di contrazione operato median-

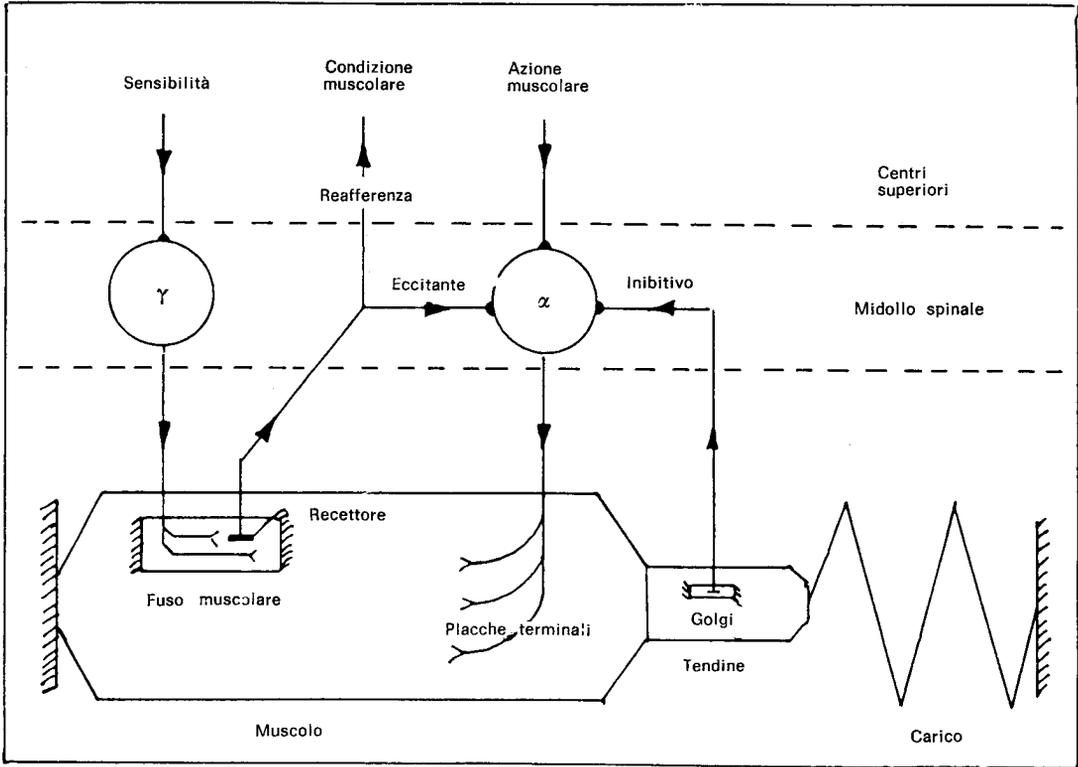


Fig. 11 - Circuito di regolazione del livello inferiore.

te l'eccitazione. Ciò rende possibili accresciuti livelli massimi di contrazione delle fibre muscolari durante impulsi di stimolo che si succedono rapidamente, dovuti ad un effetto di « superposizione » (Frank). Il valore massimo della contrazione, il cosiddetto tetano completo, viene raggiunto con una frequenza degli impulsi di stimolo di circa 50 o poco più impulsi al secondo.

Se un fuscolo muscolare viene portato tramite la sua fibra nervosa γ in un campo di sensibilità più elevato, mentre le corrispondenti fibre muscolari sono portate contemporaneamente alla contrazione sul loro motoneurone α , ne consegue una autoeccitazione dei circuiti di regolazione inferiori tramite l'effetto del feedback positivo. Il mantenimento di un certo tono muscolare contrattile non ha più bisogno di ulteriori informazioni (di eccitazione) ininterrotte da parte dei centri superiori e richiede con ciò anche minore attenzione da questa parte. I centri superiori sono così parzialmen-

te alleggeriti. Solamente una regolazione del tono ad un altro livello avviene mediante comandi dai centri di proiezione motoria superiore sulle fibre dei fusi muscolari intrafusali.

Anche i tendini contengono « misuratori di allungamento » muscolari, cioè i cosiddetti apparati del Golgi (fusi tendinei). I segnali generati in essi, corrispondenti alla tensione tendinea, vengono riaccoppiati ai motoneuroni α corrispondenti, ora però ad entrate inibitive. L'eccitazione muscolare viene così frenata e limitata. Ciò corrisponde, nei casi limite, ad una azione protettiva per muscoli e tendini.

I sistemi dei circuiti di regolazione dei livelli inferiori sono esclusivamente circuiti interni di regolazione.

2. Circuiti di regolazione dei livelli medi e superiori

Qui si tratta, come nei circuiti di regolazione dei piani inferiori, di circuiti

di regolazione esclusivamente interni. Delle loro funzioni più importanti fanno parte il controllo e il coordinamento dei processi motori automatizzati, cioè stereotipi. Anche se l'effetto delle azioni delle unità motorie dell'organismo da loro controllate porta a dei mutamenti delle posizioni del corpo o di parte di esso nell'ambiente, il flusso di informazioni che sta alla base del processo motorio avviene esclusivamente all'interno dell'organismo.

Si devono considerare come centri dei circuiti di regolazione dei livelli medi e superiori i centri subcorticali e soprasspinali dello schema funzionale della Fig. 3. In essi trovano la loro origine gli interventi di correzione dell'andamento dei processi motori preprogrammati. Dal controllo del processo motorio deriva una *regolazione* del movimento.

Essa è possibile soltanto se questi centri ricevono continuamente informazioni di ritorno sull'effettivo andamento del processo motorio dai sensori cinestetici. Questa *reafferenzia propriocettiva* diventa cosciente per l'atleta durante un processo motorio stereotipo solo in piccola parte come percezione cinestetica. La maggior parte dei segnali refferenti non supera la soglia della coscienza.

Alcune rappresentazioni globali del principio di refferenza per il controllo e la regolazione dei processi motori sportivi inducono a idee sbagliate circa i rapporti di fase temporali tra valore desiderato e valore effettivo, da cui dipende in definitiva tutta la regolazione del processo motorio. Non si può ignorare che esiste una notevolissima differenza di fase temporale tra il segnale di controllo originario e il segnale refferente.

Per rendere la cosa più chiara prendiamo da un processo motorio volontario una informazione istantanea qualsiasi come segnale di comando per la variazione di contrazione di un muscolo di un piede: dovuto ai tempi che conseguono dalla velocità di propagazione del segnale di comando e di refferenza, ai tempi di latenza nelle variazioni di contrazione, etc., bisogna aspettarsi un tempo di almeno 60-120 millisecondi dall'uscita

del segnale di comando all'entrata del segnale di refferenza. In confronto al tempo di appoggio nello stacco di un salto in lungo, ad esempio, che dura dai 100 ai 150 millisecondi, questo tempo non è affatto trascurabile.

Poiché un confronto tra il valore desiderato e il valore effettivo è possibile soltanto con segnali coincidenti nel tempo, *anche i segnali refferenti devono essere memorizzati nel corso del processo di apprendimento motorio allo stesso livello dei segnali di controllo efferenti* del programma di movimento.

L'« auto and cross correlation » ipotizzata da Trincker si riferisce con ciò ad un confronto tra i segnali di refferenza e i « valori di refferenza desiderati » memorizzati in molte ripetizioni dello stesso processo motorio. Essa tiene così conto della differenza di fase temporale tra i segnali di controllo e quelli di refferenza.

A seconda del risultato del confronto valore desiderato — valore effettivo vengono controllate inibizioni o eccitazioni nel sistema neuromotorio. L'andamento del movimento viene portato avanti secondo il programma, o viene corretto o viene perfino interrotto tramite il rafforzamento di inibizioni.

Non basta però considerare solamente la differenza tra valore desiderato e valore effettivo. Per la correzione del processo motorio deve essere considerata anche la velocità con cui questa differenza aumenta o diminuisce e in quale direzione si sviluppa. E' evidente quali enormi esigenze qualitative e quantitative si pongono ai centri di regolazione medi e superiori. Se si pensa che essi (oltre al cervello stesso) fanno parte degli elementi meno conosciuti dell'intero sistema per il controllo del movimento, si capisce quanto siamo ancora lontani da una vera comprensione dei processi interni, e non soltanto di quelli relativi al controllo del movimento.

3. Circuiti di regolazione del livello più alto

Caratteristica essenziale di questi complessi sistemi e circuiti di regolazione è la flessibilità delle loro strutture. Per il fatto che il flusso di informa-

zioni refferente conduce all'ambiente esterno, vengono inseriti organi di senso per controllare e regolare il movimento, il cui adattamento allo stimolo di entrata viene risolto mediante propri sistemi di regolazione. Il riflusso di segnali refferenti relativamente rapido nei circuiti interni di regolazione ha soltanto un ruolo subordinato nei movimenti puramente volontari. Le costanti di tempo di regolazione e i tempi di reazione del sistema di regolazione del movimento volontario puro vengono determinate in primo luogo dalle corrispondenti caratteristiche di ricezione e di tra-

tardo dei tempi di reazione dei circuiti interni di regolazione.

Il sistema di regolazione è, quindi, nell'insieme più lento, ma deve disporre di caratteristiche prognostiche enormi. Deve, infatti, poter estrapolare con sicurezza nel futuro sulla base di tendenze di movimento riconoscibili. Queste qualità sono ampiamente condizionate dall'« esperienza di movimento ». La differenza risulta chiara quando si confronta il modo in cui un bambino cerca di afferrare una palla con la stessa azione eseguita da un adulto (Fig. 13). La presa dell'adulto viene condotta in di-

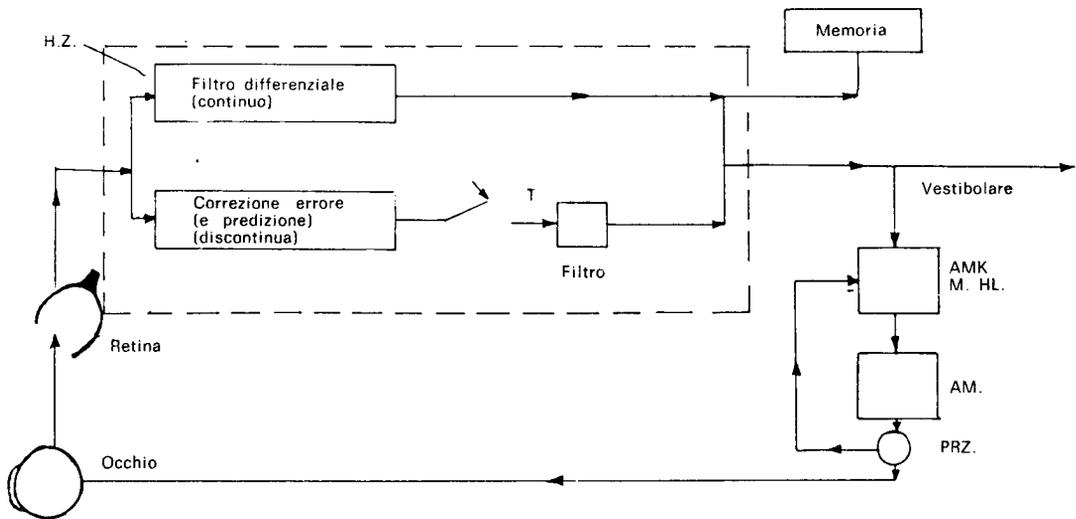


Fig. 12 - Rappresentazione schematica del sistema del movimento oculare (secondo Vossius).

sferimento dei relativi organi di senso, cioè in sostanza occhio e orecchio.

L'andamento spazio-temporale della posizione dei propri segmenti corporei partecipanti al movimento viene rilevato dall'occhio. La corretta ricezione dell'informazione ottica dipende in primo luogo dalla funzionalità del movimento oculare (Fig. 12). L'adattamento dell'apertura pupillare alla luminosità viene controllato da sottosistemi. Tra la ricezione dell'informazione e la sua appercezione, cioè il riconoscimento cosciente del contenuto dell'informazione, che è condizionato da un processo di associazione, c'è un notevole ritardo che in media è più grande del ri-

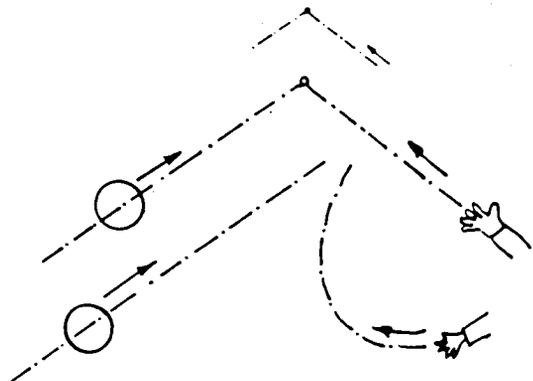


Fig. 13 - Illustrazione dell'importanza dell'elaborazione di dati ad alto livello sull'esempio di un movimento abile di presa di una palla in volo (sopra) e di uno goffo (sotto) secondo Erismann.

rezione della « rotta di collisione » con la palla.

Ciò significa che l'adulto fa una estrapolazione precisa della traiettoria, mentre dal movimento della presa del bambino si può dedurre la mancanza di capacità prognostiche, che sono ancora sottosviluppate nel suo sistema di regolazione esterno.

La funzione del senso della vista come fonte di informazione più importante relativa al mondo esterno deve poter sod-

Tutti i sistemi di regolazione sono connessi mediante collegamenti trasversali con altri sistemi di regolazione, non solo con quelli del senso della vista ma anche con quelli di altri organi di senso. Ciò si evidenzia particolarmente nel collegamento con l'apparato vestibolare. Nel movimento volontario l'occhio si assume di fatto una parte importante della regolazione dell'equilibrio (Fig. 14).

Le connessioni vengono controllate dai centri di regolazione superiori. Pre-

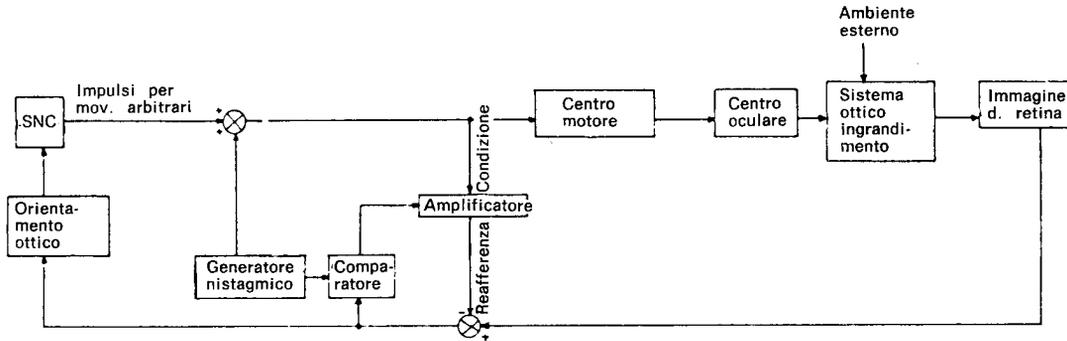


Fig. 14 - Schema della regolazione ottica di equilibrio secondo il principio di refferenza (secondo Schober).

disfare le più alte esigenze di elaborazione di dati. Quanto più complicato diventa il movimento tanto più grandi diventano gli svariati influssi di disturbo che il sistema di regolazione e controllo deve superare e compensare. Tutti i circuiti di regolazione del senso della vista sono perciò protetti da complessi e molteplici sistemi di controllo.

Ai molteplici sistemi nervosi di regolazione per un preciso e rapido controllo del movimento appartiene anche un sistema di controllo umorale che agisce più lentamente, però in modo tanto più efficace.

Questa regolazione agisce soprattutto in casi limite: dolore e spavento, per esempio, portano ad un immediato aumento del versamento di adrenalina che conduce ad una apertura pupillare massima. La dilatazione della pupilla corrisponde ad un rafforzamento massimale dello stimolo sulla retina (feedback positivo), che altrimenti sarebbe fortemente ridotto per l'effetto del dolore o dello shock, se non addirittura completamente perduto.

similmente essi servono alla compensazione di informazioni, soprattutto in caso di condizioni anomale; ad esempio, durante un sovraccarico di stimoli in uno dei sistemi (abbagliamento per una luce improvvisa troppo forte, e così via). Nell'osservazione dei circuiti di regolazione esterni la funzione del senso della vista è senz'altro di primaria importanza. Non bisogna dimenticare però che in molti casi anche alla refferenza acustica spetta un compito, in genere piuttosto integrativo o complementare. Essa può avere, per esempio, notevole importanza in tipi di sport con la palla, come il tennis e il tennis da tavolo. Anche nell'ambito di molti processi motori sportivi stereotipi l'importanza della refferenza acustica non è da sottovalutare.

Per la « elaborazione di dati » contenuti nei segnali di entrata refferenti ottici ed acustici delle parti esterne dei circuiti di regolazione è competente, tra i movimenti volontari puri, in primo luogo la memoria a breve termine in qualità di « memoria operativa », mentre la

memoria a lungo termine serve come « memoria basilare » per i meccanismi di associazione e la formazione dei segnali di controllo efferenti per le unità motorie.

E) Circa il processo di apprendimento motorio

1. *Scopo dell'apprendimento: la stabilità dinamica del movimento*

L'andamento di un movimento perfettamente coordinato inizia sempre da un complesso dei più diversi stati di allungamento dei muscoli e viene eseguito con la minima forza muscolare necessaria. Si svolge sempre allo stesso modo nella sua totalità e in tutti i suoi particolari. L'andamento di un movimento può essere considerato dinamicamente stabile se è riproducibile a volontà in tutte le sue particolarità spazio-temporali.

Per questo è necessario un vasto orientamento sulle condizioni momentanee di tutti i muscoli interessati. Esso

viene reso cosciente in genere all'inizio del processo motorio, però nel processo motorio automatizzato viene rimosso nel campo inconscio (e parzialmente subconscio).

Tutte le importanti forze reattive che si formano nei diversi settori degli elementi motori attivi devono inoltre partecipare direttamente e positivamente al movimento stesso. Questo presuppone che sia tutte le singole attività muscolari sia la loro totalità nel sistema biomeccanico devono sempre adattarsi alle condizioni di allungamento che di volta in volta sussistono; e cioè non soltanto all'inizio ma anche durante l'intero svolgimento del movimento.

Bernstein ha definito come coordinamento di un movimento « il superamento di gradi di libertà in eccedenza di un organismo in movimento e il suo inquadramento in un sistema di controllo ». Da questa definizione segue che deve essere conseguita non una fissazione dei gradi di libertà sovrabbondanti, bensì la loro utilizzazione per il movimento stesso. Questa constatazione è importante



perché il numero complessivo dei gradi di libertà (di movimento) del corpo umano è a tre cifre. La mobilità delle punte delle dita da sola, riferita alla cassa toracica, ha 12 « gradi di libertà », e quella delle articolazioni della mano, riferita alla scapola, ne ha 7 (Tschaidse).

Le forze reattive condizionate dalle correlazioni di elementi confinanti nelle catene muscolari delle estremità di fatto non ostacolano assolutamente l'andamento di un movimento eseguito perfettamente. Dopo molte indagini e ricerche risulta piuttosto che esse partecipano al movimento in modo attivo.

All'inizio di un processo di apprendimento motorio queste forze frenano l'andamento del movimento. Esse possono essere neutralizzate principalmente dalla limitazione dei « gradi di libertà », che richiede però generalmente una potenza muscolare aggiuntiva. Il movimento da apprendere viene eseguito all'inizio con molto più dell'impiego muscolare ottimale e perciò più lentamente.

Durante il processo di apprendimento motorio vengono liberati successivamente « gradi di libertà » che disturbano meno l'andamento del movimento. Così il movimento diventa chiaramente più sicuro e più « rotondo ».

Alla fine si raggiunge non solo l'utilizzazione delle forze muscolari originariamente partecipanti ma, grazie alla liberazione dei necessari « gradi di libertà », anche la partecipazione attiva delle forze reattive di elementi confinanti nell'esecuzione del movimento.

2. *Lo sviluppo e la formazione dello stereotipo dinamico dei processi motori sportivi*

Ogni processo motorio è contraddistinto da uno svolgimento, per lui tipico, degli stati di eccitazione e di inibizione all'interno dell'intero sistema neuromotorio, a cui segue un corrispondente svolgimento di portamento del sistema biomeccanico. Tra lo stato delle eccitazioni e delle inibizioni delle cellule nervose che partecipano al controllo e alla regolazione del movimento e lo stato della eccitazione muscolare, esiste — in qualsiasi momento del processo

motorio — un chiaro rapporto. Questo rapporto viene controllato e mantenuto dall'azione d'insieme dei circuiti di controllo e regolazione interni ed esterni.

L'organizzazione funzionale del controllo e della regolazione dei movimenti non è determinata però da uno schema strutturale immutabile. L'azione d'insieme dei diversi centri di controllo e regolazione sui livelli diversi si può influenzare e mutare con l'allenamento!

Qui è particolarmente importante il fatto che non solo i diversi centri di regolazione dell'organismo agiscono sugli elementi e unità motorie controllati da loro, ma che anche questi esercitano una (re)azione sulle funzioni dei centri di regolazione. L'eccitazione e l'inibizione delle cellule nervose allo scopo di controllare il movimento riesce tanto per l'influsso del SNC quanto per quello dei propriorecettori.

I segnali di risposta dei propriorecettori sull'andamento dello stato e del comportamento dei muscoli e degli arti durante il movimento hanno come conseguenza, da parte loro, nei centri di regolazione, corrispondenti stati di eccitazione che, inoltre, sono anche influenzati da segnali degli organi di senso come l'occhio e l'orecchio e da segnali dell'apparato vestibolare.

Si suppone che, mediante le eccitazioni ed inibizioni che si manifestano sincronicamente, si formano, nei diversi centri, connessioni materialmente codificate che si consolidano sempre più nel corso di molte ripetizioni dello stesso processo motorio e formano infine uno « stereotipo dinamico » tipico per il relativo processo motorio. L'uomo dispone normalmente, a seconda del suo talento e della sua attività normale o sportiva, di movimenti elementari automatizzati più o meno numerosi e perfetti. Qualsiasi movimento volontario contiene già una certa parte di tali elementi automatizzati. Per il loro controllo all'interno del complesso neuromotorio, lo schema strutturale della regolazione del movimento è caratterizzato da una chiara predominanza dei centri inferiori di regolazione (quelli più « svelti »), con la completa esclusione dei centri superiori (più « lenti »).

All'inizio di un processo di apprendimento motorio la parte non automatizzata del processo motorio deve essere controllata ancora coscientemente. Nel controllo di queste parti del processo motorio dominano i centri superiori.

Elementi di processi motori già automatizzati e altri puramente volontari devono essere aggiunti ad un complesso schema di movimento e automatizzati nella loro totalità durante il processo di apprendimento motorio. Per quanto riguarda il trasferimento (transfer) delle parti del movimento automatizzate nel processo motorio complesso si parla nella pedagogia di un « trasferimento di elementi definiti e già automatizzati di esercizi complessi ». Poiché il trasferimento di elementi definiti e già automatizzati di esercizi complessi, in genere, è più facile della formazione di nuovi automatismi, i soggetti con molteplici ed elementari capacità di movimento, apprendono movimenti complessi più rapidamente e più facilmente. Questo è uno degli argomenti principali per giustificare la multilateralità nell'attività sportiva di bambini e giovani e per la formazione di una larga base di capacità di movimenti sportivi diversi, che possano essere trasferiti, in seguito, come elementi in processi motori specifici.

I processi motori sportivi sono spesso di natura molto complessa. Essi comprendono generalmente elementi che, all'inizio del processo di apprendimento motorio, si distribuiscono lungo tutta la scala dal puro movimento volontario fino al movimento (parziale) già perfettamente automatizzato, e che si sovrappongono in molti modi durante lo svolgimento del complesso motorio. Conseguentemente *anche le funzioni di controllo e di regolazione dei diversi livelli si devono sovrapporre in modo analogo.*

Nella fase iniziale dei processi di apprendimento motorio, le svariate costanti di tempo dei diversi circuiti di regolazione e controllo interni ed esterni conducono facilmente ad interferenze tra i diversi segnali refferenti ai diversi livelli di controllo. Questo può portare ad un disorientamento spaziale e

temporale. I « sensori » dei circuiti di regolazione e controllo « vedono » spostamenti nello scopo del movimento (in parte fittizi). I centri di regolazione e controllo cercano di conseguenza di rimettere a posto il controllo del movimento, ciò che a questo punto diventa impossibile. Tutto il processo motorio « crolla » alla fine a causa di un totale « caos di regolazione e controllo ». L'allenamento tecnico nello sport viene organizzato nello stadio iniziale del processo di apprendimento motorio preferibilmente secondo un modello modulare: si combinano soprattutto i più importanti movimenti parziali in piccole unità allo scopo di collegarle l'una con l'altra in seguito, durante il trasferimento di elementi definiti e già automatizzati di esercizi complessi in un processo motorio complesso.

Per un determinato processo motorio il decorso dello stato di eccitazione ed inibizione nell'intero sistema neuromotorio si modifica ad ogni ripetizione. E' tipico del processo di apprendimento motorio che ogni ripetizione divenga sempre più simile ma mai assolutamente uguale. Poiché anche influssi esterni, fattori dovuti alle condizioni fisiche e psicologiche, hanno una influenza importante sull'andamento delle eccitazioni ed inibizioni (e con ciò sull'andamento del movimento), è comprensibile che nelle tecniche sportive non esiste la perfezione assoluta, nel senso della precisa ripetibilità dei processi motori.

Questo vale particolarmente per i processi motori sportivi aciclici, come salti e lanci nell'atletica leggera, la ginnastica artistica, il pattinaggio artistico su ghiaccio, ecc. Nei processi motori ciclici, grazie alle molteplici ripetizioni dei singoli cicli, esiste un avvicinamento sostanzialmente maggiore alla identità assoluta dell'andamento delle eccitazioni ed inibizioni. Per brevi tratti è perfino immaginabile una perfetta identità.

3. *Una opinione ipotetica sul problema della correzione del movimento*

La situazione di partenza

Per arrivare ad una raffigurazione puramente funzionale che ci permetta ipo-

tesi verosimili per la spiegazione delle relazioni sistematiche nel controllo del movimento, dobbiamo liberarci dai metodi concettuali tradizionali ed operare con metodi e concetti diversi, che in molti campi scientifico-tecnici sono usuali ormai da anni.

L'azione di insieme dei singoli circuiti di controllo e regolazione e dei loro centri può essere spiegata soltanto con una considerazione piuttosto globale delle loro singole funzioni nel quadro dell'intero sistema. Questo vale in particolare modo se cerchiamo di comprendere le condizioni per il controllo e la regolazione della correzione di un errore nello svolgimento di un processo motorio sportivo.

La formazione di uno « stereotipo dinamico » per la regolazione del movimento, che permette una « stabilità dinamica » del movimento entro limiti di una certa « ampiezza di dispersione » (relativa allo svolgimento ottimale del processo motorio), è lo scopo dichiarato del processo di apprendimento motorio. Se partiamo dal fatto che ogni ripetizione di un processo motorio « automatizzato » subisce inevitabilmente variazioni nel decorso dell'andamento di eccitazioni ed inibizioni a causa di influssi interni ed esterni, la stabilità dinamica del movimento si può mantenere soltanto tramite piccoli interventi correttivi molto veloci e « precisi » del complesso meccanismo di regolazione e controllo.

A seconda del tipo di deviazione dello svolgimento ottimale del movimento, l'intervento correttivo stabilizzante è fondamentalmente possibile tramite la funzione di tre diversi sistemi di circuiti di regolazione:

a) il circuito di regolazione, inerente ai riflessi, del livello di controllo inferiore (livello dei riflessi);

b) la « funzione delle auto and cross correlazioni » (Trincker) sul livello dei centri di controllo e regolazione che contengono la memorizzazione del programma del processo motorio;

c) le istanze di controllo e regolazione dei livelli più alti, incluso il livello cosciente.

a) Reagisce in modo straordinariamente veloce, però è molto limitato nel

suo campo di intervento, mentre b), condizionato dalla durata di propagazione dei segnali propriorecettivi, è più lento ma può intervenire in un campo molto più ampio, riferito a possibili deviazioni dallo svolgimento ottimale del movimento. Entrambi non bastano però a spiegare le rapidissime correzioni di errori del movimento che si possono osservare occasionalmente in atleti molto esperti e che inevitabilmente richiedono un « riconoscimento » di una situazione momentanea mutata nello svolgimento del movimento, cioè un errore nello svolgimento del processo motorio.

Per questo processo di riconoscimento entrano probabilmente in gioco in primo luogo quegli organi di senso che fanno parte del sistema di orientamento spaziale. Essi sono collegati con il SNC tramite linee di trasmissione estremamente corte e richiedono perciò soltanto tempi molto brevi per la trasmissione dei segnali. « Riconoscimento » però presuppone « coscienza ». Poiché il campo della coscienza del SNC possiede una capacità molto limitata di ricezione dei segnali, esso sembra a prima vista inadatto alla produzione di interventi correttivi assai rapidi e sarebbe quindi da escludere a priori.

Questo vale sicuramente nel caso di un movimento volontario puro. Nel caso di un processo motorio stereotipo, non si possono — però — escludere delle possibilità ipotetiche di produzione di interventi correttivi più rapidi e fino ad un certo punto perfino « coscienti », che trovano la loro origine a questo livello. Sotto questo aspetto diventa pensabile la seguente ipotesi:

— LO SVILUPPO DELLE CAPACITÀ CORRETTIVE DEL SISTEMA

Le correzioni del movimento si svolgono nella fase iniziale di un processo di apprendimento motorio con ritardi relativamente grandi perché per il riconoscimento di un errore di movimento, in un primo momento ancora ampiamente conscio, deve essere dapprima captato ed elaborato un gran numero di segnali (« segni ») che rispecchiano questo errore. Questo vale anche per il rilevamento inconscio dell'errore di mo-

vimento nelle istanze di controllo e regolazione medie ed inferiori, dove i segnali del programma di movimento e i corrispondenti segnali di refferenza per il confronto tra stato di movimento da raggiungere ad un determinato momento e stato effettivamente raggiunto sono memorizzati in modo ancora rudimentale ed instabile. Il sistema ha ancora bisogno di errori con ampiezza piuttosto grande per essere in grado di riconoscere con sicurezza deviazioni dalla forma ottimale del movimento.

Con il progredire del processo di apprendimento motorio e l'esperienza dell'atleta gli errori di movimento vengono riconosciuti e corretti da segnali sempre più piccoli, e perciò più rapidamente. *Il sistema impara ad estrapolare in modo sempre più sottile e sicuro*, e infine è in grado di analizzare, già grazie a pochi « segni », il tipo, la direzione nello spazio e la velocità con cui si sviluppa l'errore di movimento e di introdurre le adeguate misure correttive.

Nello stadio di avanzato perfezionamento del sistema si può parlare di un tipo di *anticipazione del controllo* e della regolazione perché le misure correttive mirano già ad uno stato di errore estrapolato, che — al momento della emissione del segnale di correzione — non è ancora raggiunto.

Questa anticipazione del controllo e della regolazione varia ed è orientata verso le condizioni momentanee temporali e spaziali interne ed esterne dello svolgimento del movimento di volta in volta prevedibili e verso la tendenza dell'errore, in modo molto svariato, perché anche la differenza di fase temporale tra segnali di controllo e segnali di refferenza nel processo motorio varia in modo molto marcato a seconda della « lunghezza della linea nervosa » (e perciò del tempo di propagazione del segnale), delle resistenze interne ed esterne, ecc.

Il sistema di controllo e regolazione del movimento si trova, durante un processo di apprendimento motorio, in un *permanente processo di adattamento* alle condizioni del sistema biomeccanico che variano in modo finalizzato mediante l'allenamento.

Variazioni dello stato di forza generale o specifica portano per esempio, tra l'altro, anche a cambiamenti delle condizioni di differenza di fase temporale nel controllo e nella regolazione del movimento, cosa che richiede un sempre nuovo adattamento dell'anticipazione del controllo e della regolazione. Questo processo di adattamento viene facilitato tramite l'allenamento della forza speciale, che ha spesso una forte somiglianza con elementi del corrispondente processo motorio sportivo.

Lo scopo di un processo di apprendimento motorio può considerarsi raggiunto se la corretta riproducibilità dell'esecuzione del movimento ha raggiunto un alto grado di probabilità. Il controllo e la regolazione del movimento si svolgono sostanzialmente ad un livello di controllo sottratto alla coscienza.

Per una corretta interpretazione cibernetica è difficile immaginarsi che un processo di apprendimento motorio possa essere mai definitivamente concluso. Un livello di controllo raggiunto e stabilizzato in modo conclusivo è praticamente impensabile nelle condizioni già mostrate.

Quanto più un processo motorio si svolge in modo « automatizzato », tanto più stabili diventano la memorizzazione del programma e il coordinamento inconscio del movimento e tanto più sicuramente l'atleta impara contemporaneamente ad « osservare » se stesso durante l'esecuzione del processo motorio. Ciò vale in modo particolare se questa auto-osservazione viene presa in considerazione in modo finalizzato già dall'inizio nell'addestramento tecnico.

Il significato della memorizzazione dei segnali refferenti per la regolazione del movimento non è stato accentuato a caso nei capitoli precedenti. I segnali refferenti stanno per il « sentire » lo stato contrattile dei propri muscoli e del proprio portamento corporeo e le impressioni, specialmente degli organi del sistema di orientamento spaziale, durante lo svolgimento del movimento. La loro percezione sempre più cosciente si può senz'altro apprendere con l'addestramento e dovrebbe, per logica conseguenza, essere un continuo compito

legato ad ogni processo di apprendimento motorio.

Si dovrebbe sempre richiamare l'attenzione degli atleti verso la percezione cosciente (il « sentire ») dei singoli elementi del movimento e interrogarli immediatamente dopo l'esecuzione dell'esercizio, finché la « sensibilità al movimento » assunta coscientemente sia ancora presente nella memoria a breve termine. La limitata capacità di ricezione e memorizzazione della memoria a breve termine e la breve « durata di presenza » dell'informazione in essa rendono sconsigliabile, soprattutto nella fase iniziale del processo di apprendimento motorio, un orientamento dell'attenzione verso parti più complesse del processo motorio. Con lo sviluppo della capacità di « osservare » se stessi durante la propria azione di movimento, le capacità del sistema di correzione degli errori di movimento vengono migliorate. È importante interrogare l'atleta soprattutto in caso di esecuzione riuscita; ciò, da un punto di vista psicologico, può essere considerato come « esperienza di successo ».

Ci può essere *solo uno svolgimento ottimale* del processo motorio, condizionato dalle condizioni interne ed esterne del momento che sussistono di volta in volta. Il campo di variazione nel quale la stabilità dinamica di un processo motorio può essere ancora conservata anche quando si presentano errori di movimento dipende certamente dalle capacità qualitative e quantitative del sistema di correggere errori di movimento, mediante adeguate misure correttive, almeno entro certi limiti.

— L'INTERVENTO CORRETTIVO DEI SISTEMI DI CIRCUITI DI REGOLAZIONE E CONTROLLO SUPERIORI

Dato che l'« auto-osservazione » si basa sulla percezione delle informazioni cinestetiche, i tempi di durata della propagazione del segnale (mostrati nel capitolo D, paragrafo 2), nonostante il miglioramento delle capacità di correzione, sono inevitabili. Correzioni molto veloci di errori del movimento, come possono essere osservate occasionalmente in atleti molto esperti (per esempio, in

salti e lanci), fanno però supporre capacità di intervento del sistema ancora più rapide. Ciò potrebbe succedere in modo che impulsi correttivi che hanno la loro origine nei centri superiori vengono sovrapposti o introdotti come segnali « trigger » nei centri medi-superiori che controllano il movimento stereotipo.

Se però determinate correzioni del movimento avvengono troppo rapidamente per essere spiegabili nel quadro dei rapporti di fase temporali della regolazione inconscia del movimento, e se d'altra parte è da escludere, per motivi evidenti, una regolazione puramente cosciente della correzione dell'errore, la abituale raffigurazione del controllo del movimento non ci dà più alcuna possibilità di spiegare questo fenomeno.

Dobbiamo perciò passare ad una definizione globale logicamente corretta dell'*effettivo livello di controllo del movimento*, livello che deriva dalla *sovrapposizione delle funzioni di controllo* e di regolazione di *tutti* i circuiti di regolazione dei livelli più diversi che partecipano al controllo del movimento. Allora, qualsiasi livello intermedio che risulta dalla complessa sovrapposizione di funzioni dei diversi livelli può essere considerato come *livello di controllo effettivo*, le cui caratteristiche (velocità, ampiezza di intervento, ecc.) devono inevitabilmente derivare (a seconda delle condizioni di sovrapposizione) dalle qualità specifiche di tutti i circuiti di controllo e di regolazione partecipanti.

Si può supporre che il rilevamento e il riconoscimento di certe forme degli errori di movimento in atleti molto esperti avvengano — nonostante tutto — negli organi del sistema per l'orientamento spaziale. Le loro linee nervose di trasmissione estremamente corte, data la vicinanza del SNC, potrebbero condurre in certe condizioni a tempi di intervento più brevi di quelli che si basano sulla refferenza cinestetica.

Qui l'intervento complementare del senso della vista e dell'apparato vestibolare potrebbe avere un ruolo decisivo. Il comportamento differenziale del senso della vista (vedi capitolo C, 2, b), dal quale risultano da una parte già

forti segnali in uscita, anche se gli stimoli in entrata sono ancora minimi, e dall'altra il comportamento proporzionale e indipendente dal tempo nella trasmissione dei segnali dell'apparato statolitico, insieme con le capacità di estrapolazione altamente sviluppate del sistema, potrebbe rendere possibile una ricezione ed elaborazione molto veloce di segnali per la correzione dell'errore di movimento.

Non basta però la semplice ricezione (percezione) e la trasmissione dell'informazione. L'elaborazione di misure correttive sulla base delle informazioni « percepite » ha — inoltre — come presupposto il loro riconoscimento (appercezione). L'appercezione richiede però processi associativi.

Non c'è dubbio che il processo di apprendimento motorio non porta con sé soltanto una memorizzazione del programma di movimento lontana dalla coscienza, corrispondente ad uno spostamento del livello di controllo effettivo verso « il basso ». Si sviluppano contemporaneamente le capacità associative la cui allenabilità è altrettanto indubbia.

C'è da supporre che i due parametri del processo di apprendimento motorio, cioè lo spostamento del livello di controllo tramite la memorizzazione del programma progressivamente più sicuro da una parte e lo sviluppo delle capacità associative dall'altra, non procedono parallelamente (Fig. 15). All'inizio dominerà la progressione della memo-

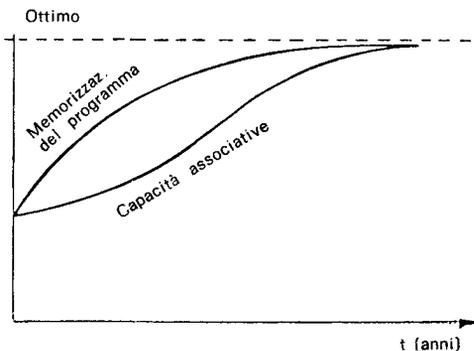


Fig. 15 - Decorso ipotetico dei parametri di effetto in un processo di apprendimento motorio.

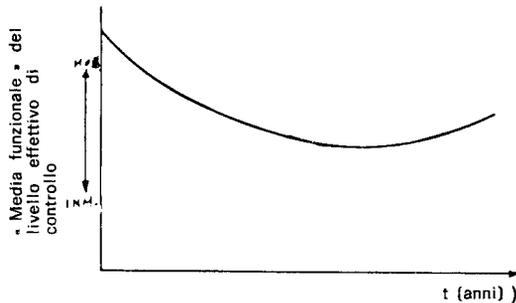


Fig. 16 - Svolgimento ipotetico dello sviluppo della media « funzionale » del livello di controllo in un processo di apprendimento motorio.

rizzazione, che però col tempo si avvicina ad una fase di saturazione. Con la crescente saturazione coincide uno sviluppo più pronunciato delle capacità associative; quando, cioè, l'atleta impara ad « osservarsi » sempre meglio. Lo sviluppo della stabilità dinamica del movimento è senza dubbio da vedere in funzione dello sviluppo di *entrambi* i parametri. La stabilità dinamica del movimento richiede, all'inizio, un decorso assolutamente perfetto del processo motorio. Solo con lo sviluppo di più pronunciate qualità associative si svilupperanno anche le capacità di estrapolazione e di anticipazione del controllo nel sistema. Ciò rende possibile il mantenimento della stabilità dinamica del movimento anche con una maggiore « ampiezza di dispersione » del decorso dell'andamento di eccitazione e di inibizione ideale.

Un intervento correttivo dei centri di regolazione vicini alla coscienza è possibile solo se le qualità associative sono altamente sviluppate nell'atleta. Solo così si può « riconoscere » un errore di movimento quando appena comincia a manifestarsi, cioè si può riconoscere da un minimo di informazioni che basta però per una estrapolazione assai sicura, da cui si può dedurre l'intervento correttivo quasi immediato.

Non è affatto detto che queste informazioni devono raggiungere il livello « pienamente cosciente » del SNC. La correzione dell'errore di movimento da parte di atleti esperti è spesso considerata come « atto istintivo ». Possiamo in-

serire però questo « istintivo » in una interpretazione del *livello effettivo di controllo*, che non si basa su concetti e schemi rigidi e classici « al di sotto » del livello cosciente, però contemporaneamente « al di sopra » del livello di controllo inconscio o subconscio. Questa raffigurazione corrisponde verosimilmente alla realtà funzionale.

Dalle esposizioni fatte finora nasce il problema di come agisce lo sviluppo dei due parametri nel corso del processo di apprendimento motorio sullo sviluppo del livello di controllo *effettivo*. Si può supporre che questo livello scen-

da fin quando domina la progressione della memorizzazione del programma di movimento, ma risalga poi con lo sviluppo più pronunciato delle capacità associative (Fig. 16).

Questa conclusione ci pare ovvia, visto che le capacità associative sono indubbiamente una funzione dei centri più alti. Il loro sviluppo può, di conseguenza, portare soltanto ad una *ascesa del livello di controllo effettivo*, mentre dalla progressiva automatizzazione del processo motorio può conseguire soltanto uno spostamento del livello di controllo effettivo nella direzione opposta.

Indirizzo dell'Autore:

Ing. Hein Beulke
Via Novelli, 72
21100 Varese

BIBLIOGRAFIA

- Anderson B., Lennerstrand G.: « Analisi di frequenza di un sistema muscolare e fuso muscolare ». In: Progressi della cibernetica. Monaco/Vienna; R. Oldenburg Verlag 1967.
- Anochin P.K.: « Fisiologia e cibernetica ». In: Naturwissenschaft 5 (1958) 533-575.
- Ashby W.R.: « Teoria dei sistemi generali e il problema della black box ». In: Processi di regolazione negli esseri viventi. Monaco 1961.
- Bejor M., Moschi A.: « Analisi di schemi biofisici applicati all'interpretazione della genesi del movimento ». In: Athleticastudi 3/4 (1980), Roma.
- Bernstein N.A.: « Circa alcuni problemi attuali della regolazione degli atti di movimento ». In: Problemi della psicologia N. 6, 1957.
- Beulke H.: « Informazione, cibernetica, controllo e regolazione ». In: Leistungssport, 8 (1978) 1: 40-55.
- Donskoj D.D.: « Principi della biomeccanica ». Berlino: Bartels & Wernitz 1975.
- Erismann T.H.: « Tra tecnica e psicologia ». Berlino/Heidelberg/New York: Springer - Verlag 1968.
- Fletcher M.J.: « Concetti basilari della cibernetica ». 4.3. Teoria sistematica. Stoccarda: Wissenschaftl. Verlagsges. 1966.
- Frank M.: « Principi cibernetici della pedagogia ». Baden-Baden: Agis Verlag 1962.
- Gawronski R.: « Sulle strutture del sistema di controllo muscolare ». In: Progressi del controllo esterno delle estremità umane ». Belgrado 1970.
- Haase J.: « Portamento e movimento e loro coordinamento spinale ». In: Sensomotoria, fisiologia degli uomini, Bd. 14. Monaco/Berlino/Vienna: Urban & Schwarzenberg 1976.
- Hassenstein B.: « Cibernetica biologica ». Heidelberg: Quelle & Meyer Verlag 1965.
- Henatsch H.D.: « Piano costruttivo dei controlli sensomotori periferici e centrali ». In: Sensomotoria; fisiologia degli uomini, Bd. 14. Monaco/Berlino/Vienna; Urban & Schwarzenberg 1976.

Ljapunow A.A.: « Sui sistemi di controllo negli organismi, e l'opinione generale sui processi vitali ». In: *Problemi di cibernetica*. Berlino: Akademie-Verlag 1966.

Majorana A.: « Il cervello, organizzazione e funzione ». Milano: Le Scienze S.p.A. 1978.

Pressler G.: « Tecnica di regolazione, elementi di base ». Mannheim: Bibliographisches Institut 1964.

Rittel H.-F.: « Cibernetica del sistema neuromuscolare ». In: *Leistungssport*, 6 (1976), 6: 464-474.

Schnabel G.: « Circa la coordinazione del movimento ». In *Bewegungslehre des Sports*. Schorndorf: Verlag K. Hoffmann 1977.

Schober H.: « I sistemi regolatori del senso della vista, loro significato e funzione ». Monaco/Vienna: R. Oldenburg Verlag 1967.

Steinbuch K.: « Automa e uomo ». Berlino/Heidelberg/New York: Springer Verlag 1965.

Trincker D.: « Memorizzazione di informazioni negli esseri viventi ». In: *Cibernetica, ponte tra le scienze*. Francoforte sul Meno: Umschau Verlag 1965.

Trincker D.: « Assunzione di informazioni e memorizzazione a breve termine al servizio dell'orientamento spaziale dell'uomo e dell'animale ». In: *Progressi della cibernetica*. Monaco/Vienna: R. Oldenburg Verlag 1967.

Tschaidse L.W.: « Il coordinamento dei movimenti volontari negli uomini dal punto di vista delle regolazioni generali del controllo e dei sistemi di controllo ». In: *Problemi della cibernetica*. Berlino: Akademie Verlag 1965.

Von Hamos E.: « Processi di regolazione non lineari nella tecnica e nella biologia ». Monaco/Vienna: R. Oldenburg Verlag 1964.

Von Holst E., Mittelstaedt H.: « Il principio della rafferenzia ». *Die Naturwissenschaften*, 37 (1950), 464-476.

Vossius G.: « Le capacità di pronostico del sistema del movimento volontario ». In: *Più recenti risultati della cibernetica*. Monaco/Vienna: R. Oldenburg Verlag 1964.

GLOSSARIO

AFFERENZA. — Designazione generale delle eccitazioni decorrenti da uno o più recettori (organi di senso) fino al sistema nervoso centrale (1).

POTENZIALE D'AZIONE (delle fibre nervose). — Stimolando una fibra nervosa (tramite l'eccitazione di un organo sensorio attraverso l'eccitazione di altre cellule nervose in contatto sinaptico con tali fibre o sperimentalmente tramite una corrente elettrica), si può registrare, dopo un tempo di latenza, una breve fluttuazione della tensione. Questa viene chiamata, appunto, potenziale d'azione (o anche: impulso nervoso, eccitamento nervoso, onda eccitatoria, spike, potenziale a punta, scarica). Nella derivazione intracellulare, l'ampiezza del potenziale d'azione è compreso fra i 60-150 mV. Poiché il potenziale di membrana a riposo è compreso normalmente fra i 30-80 mV (interno negativo), durante il potenziale d'azione, il potenziale di membrana,

non solo si azzerava, ma si inverte (over-shoot, l'interno diventa transitoriamente positivo).

Nella derivazione extracellulare, l'ampiezza e la forma del potenziale d'azione vengono determinate dalle condizioni di derivazione; la variazione di tensione tipica è negativa (1).

ASSONE. — Sinonimo di neurite, è il prolungamento di una cellula nervosa, che propaga l'eccitamento secondo la legge del tutto o nulla (1).

EFFERENZA. — Designazione generale per le eccitazioni decorrenti dal SNC alla periferia (1).

UNITA' MOTORIA. — Le fibre nervose motorie dei vertebrati si ramificano così che un motoneurone innerva più di una fibra muscolare. Durante la scarica di un singolo motoneurone, si contraggono perciò, contemporaneamente, un numero più o meno grande di fibre muscolari.

Il motoneurone e tutte le fibre muscolari da esso innervate, costituiscono la cosiddetta « unità motoria » (1).

MOTONEURONE. — Una cellula nervosa i cui prolungamenti innervano un muscolo: tali cellule sono situate nelle corna anteriori del midollo spinale e nei nuclei motori dei nervi cranici. Nei vertebrati, i motoneuroni sono i punti d'arrivo di tutti i riflessi muscolari importanti (1).

FIBRE MUSCOLARI INTRAFUSALI. — Sono le fibre muscolari poste all'interno dei fusi muscolari dei vertebrati (1).

FUSO MUSCOLARE. — Un recettore meccanico che si riscontra nel muscolo scheletrico dei vertebrati. Il singolo muscolo contiene da alcuni a numerosi fusi muscolari. Lo stimolo appropriato è l'allungamento del muscolo stesso.

I fusi muscolari sono costituiti da 5-7 fibre muscolari striate (fibre intrafusali o fasci di Weismann), che sono contenute in un involucro connettivale a forma di fuso. Queste fibre muscolari sono innervate dalle fibre motorie Y e da 2-4 fibre sensitive del gruppo A α e A β .

Le fibre sensitive formano, circa nel mezzo del fuso, delle ramificazioni finali a fiorami od anulo-spirali, che aderiscono alle fibre muscolari intrafusali. I fusi sono in parallelo alle normali fibre muscolari scheletriche. Durante un allungamento del muscolo si rinforza, nelle fibre efferenti, la scarica costante, già presente alla lunghezza di riposo del muscolo e tale frequenza cresce linearmente con l'allungamento delle fibre muscolari.

Le fibre efferenti X possono far contrarre le fibre intrafusali, modulando così le risposte del fuso agli allungamenti. I fusi muscolari controllano il riflesso monosinaptico di stiramento, come pure altri riflessi polisinaptici (1).

CONTROLLO MUSCOLARE o controllo nervoso del muscolo. — L'attività del muscolo, nei vertebrati, viene controllata tramite una serie di riflessi ed afferenze dal S.N.C.. Vi appartengono:

1. I riflessi propriocettivi monosinaptici e disinaptici, che partono dagli organi sensorii posti nel muscolo stesso. Il riflesso monosinaptico controllato dai fusi muscolari è un circuito per il mantenimento della lunghezza muscolare in diverse condizioni di carico. Il riflesso dinaptico,

controllato dai corpuscoli del Golgi, è fra l'altro un riflesso di protezione in presenza di carichi troppo grandi.

2. I riflessi muscolari di — e polisinpatici partono da fusi tendinei e muscolari situati in altri muscoli. Contemporaneamente alla messa in funzione del riflesso propriocettivo dell'agonista, tramite l'azione di — o polisinpatici dei fusi muscolari, vengono attivati muscoli sinergici ed inibiti gli antagonisti. Contemporaneamente vengono anche controllati i corrispondenti muscoli della metà controlaterale del corpo.

3. I riflessi esteroceettivi. L'attività muscolare è controllata tramite altri organi sensori, principalmente recettori cutanei. Per esempio, l'eccitamento dei recettori cutanei della parte cutanea sovrastante un muscolo può portare alla contrazione del muscolo stesso ed alla inibizione di altri muscoli. I controlli (riflessi) finora descritti sono mediati essenzialmente dal midollo spinale.

4. L'attività muscolare riflessa è controllata anche da una serie di meccanismi superiori. Vi appartengono i riflessi posturali e del portamento che partono dal labirinto, dagli occhi e dai propriocettori della zona cervicale e che concorrono a determinare il tono muscolare. Questi controlli sono interdipendenti con l'attività volontaria. Essi sono organizzati essenzialmente dal cervelletto e dal mesencefalo.

5. La mobilità volontaria, nei mammiferi, è controllata dalla corteccia cerebrale (corteccia motoria, vie piramidali ed extrapiramidali) (1).

TONO MUSCOLARE E SUO CONTROLLO NERVOSO. — Per « tono muscolare », si intende uno stato di tensione continua di un muscolo, che può essere attivamente sostenuto e modificato, tramite un controllo nervoso. Al tono si possono sovrapporre fenomeni fascici più o meno rapidi (contrazione o rilassamento). Il tono è controllato da una serie di diversi meccanismi:

1. Nel muscolo scheletrico degli animali a sangue caldo sono attivate in successione rotatoria (rotazione dell'attività) solamente un ben determinato numero di unità motorie, *che danno luogo ad una tensione muscolare all'incirca costante. La forza muscolare può essere variata, variando il numero delle U.M. attive e la loro frequenza di attivazione.*

2. La fibra muscolare scheletrica dei vertebrati può essere portata ad uno stato di contrazione permanente. In questo caso, la successione temporale degli stimoli è talmente fitta (elevata frequenza) che i singoli spasmi si fondono in una contrazione continua (tetano) (1).

PROPRIOCETTORI O PROPRIORECETTORI. —

1. In senso stretto: recettori meccanici sensibili alla lunghezza o alla tensione presente in muscoli, tendini ed articolazioni. Nei vertebrati vi appartengono principalmente i fusi muscolari, i corpuscoli del Golgi e i recettori articolari.

2. Talvolta vengono inclusi in tale classe an-

che i recettori delle sensazioni posturali statiche e dinamiche.

3. In senso più ampio (sinonimo di recettore interno): tutti i recettori che rispondono alle condizioni o alle loro variazioni all'interno del corpo (1).

PRINCIPIO DELLA REAFFERENZA. — In generale è il principio funzionale del controllo nervoso, che si basa sull'arco riflesso chiuso, cioè nell'influenza reciproca tra recettore ed effetto (retroazione e feed-back).

Il principio di retroazione trasforma l'arco riflesso aperto in un circuito funzionale chiuso. L'attività di un effetto è infatti retrosegnalata tramite i recettori. In questo modo è garantito un continuo controllo di tutte le reazioni dell'organismo.

La refferenza, però, astraendo dalle sue particolari qualità neurofisiologiche, può essere considerata dal punto di vista cibernetico, come un collegamento retroattivo. Esso viene detto positivo, quando la prestazione originaria viene rafforzata, e negativo, quando la prestazione originaria viene indebolita. Secondo questo presupposto, il principio di retroazione contribuisce a raggiungere un soddisfacente adattamento alla variabilità dell'ambiente esterno (2).

RECLUTAMENTO O RECRUITMENT. — L'attività di determinate strutture nervose (la formazione reticolare) può influenzare l'attività in gruppo di neuroni, aumentando la frequenza di scarica di neuroni già attivati, mentre l'attività di singoli neuroni cresce lentamente e parallelamente, attivando neuroni prima inattivi. Questo tipo di attivazione di unità nervose è denominato appunto reclutamento o recruitment.

Analogamente, nel muscolo scheletrico dei vertebrati, si parla di un reclutamento di unità motorie quando, per ottenere un crescente sviluppo di tensione, aumenta sia il numero di motoneuroni attivati sia la loro frequenza di scarica (2).

VALORE SOGLIA. — Il valore soglia di un neurone è quella quantità minima di energia stimolatrice, che deve agire per un determinato periodo di tempo sul neurone affinché esso giunga allo stato di eccitazione cioè venga generato un potenziale d'azione) (2).

TETANO O TONO TETANICO. — Una contrazione continua di un muscolo (o uno stato di tensione muscolare) provocata dalla sommazione delle singole contrazioni susseguentesi rapidamente l'una all'altra (1).

Le definizioni sono ricavate da:

(1) BURKHARDT D.: *Vocabolario di neurofisiologia*, Iena 1969.

(2) KLAUS C.: *Vocabolario di cibernetica*, Francoforte 1969.

La loro presentazione in italiano è stata rielaborata dal Prof. Tanzi, Pavia.