

IL PROBLEMA DELL'INTERRELAZIONE TRA COORDINAZIONE E LOCALIZZAZIONE

N. A. BERNŠTEJN

(Arch. Biol. Nauk, 38, 1935)

2.1 Le equazioni differenziali fondamentali dei movimenti

La relazione tra i movimenti e gli impulsi nervosi che li suscitano è estremamente complessa e non è, per di più, in alcun modo univoca. Ho già intrapreso un'analisi di questa relazione in una serie di studi precedenti (1, 2, 3, 4) e per questa ragione presenterò qui soltanto un breve sommario di tali conclusioni, che possono essere considerate attualmente chiaramente confermate. L'obiettivo principale di questo sommario è di servire come introduzione ad un'ulteriore discussione.

Il grado di tensione di un muscolo è una funzione, in primo luogo, della sua condizione innervativa (tetanica o tonica) E e, in secondo luogo, della sua lunghezza in un determinato istante e della velocità con la quale questa lunghezza cambia nel tempo. Nell'organismo intatto, la lunghezza di un muscolo è, a sua volta, una funzione dell'angolo articolare α ; per questa ragione, noi possiamo scrivere che il momento di un muscolo, rispetto all'articolazione, è:

$$F = F\left(E, \alpha, \frac{d\alpha}{dt}\right) \quad (1)$$

D'altro canto, possiamo asserire che l'accelerazione angolare di un segmento controllato da un dato muscolo è direttamente proporzionale al momento del muscolo F ed inversamente proporzionale al momento d'inerzia del segmento I .

In questo modo

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{F}{I} \quad (2)$$

Se vi sono altre sorgenti di forza, oltre al muscolo che agisce sul segmento, la situazione è un po' più complicata. Limitiamoci, per semplicità, ad una sola forza esterna, la forza di gravità. Nel caso più semplice, che abbiamo appena descritto, nel quale consideriamo il movimento di un solo segmento, in relazione ad un altro segmento fisso, il momento dovuto alla forza di gravità G è, come il momento del muscolo, una funzione dell'angolo articolare,

$$G = G(\alpha) \quad (1a)$$

L'accelerazione angolare del segmento, sotto l'influenza di entrambi i momenti insieme, viene espressa dall'equazione

$$\frac{d^2 \mathbf{a}}{dt^2} = \frac{F + G}{I}$$

Se introduciamo in quest'equazione le espressioni (1) e (1a), per F e G, otteniamo una relazione della seguente forma:

$$I \frac{d^2 \mathbf{a}}{dt^2} = F \left(E, \mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt} \right) + G(\mathbf{a}) \quad (3)$$

Questa è l'equazione fondamentale del movimento di un singolo segmento, in un campo gravitazionale, sotto l'influenza di un singolo muscolo, nel quale il livello dell'innervazione è rappresentato da E.

Nei casi in cui il sistema in movimento è rappresentato non da uno, ma da parecchi segmenti, e nel quale siamo costretti a prendere in considerazione l'attività di molti muscoli, l'equazione (3) diviene estremamente complicata, non soltanto quantitativamente, ma anche qualitativamente, perché entrano in gioco considerazioni sull'effetto meccanico di ciascun muscolo sugli altri ed il momento di inerzia del sistema diviene un termine variabile.

Tuttavia, malgrado il fatto che le complicazioni che sorgono in questo caso siano così grandi da impedire la scrittura dell'equazione (3) anche nella sua forma più generale, gli aspetti fisiologici del problema differiscono soltanto leggermente e le complicazioni comprendono essenzialmente soltanto gli aspetti matematici e meccanici del movimento. Per questa ragione, nel presente contesto, ci limiteremo soltanto al caso più semplice dell'equazione (3).

Questa è un'equazione differenziale di secondo ordine, che può essere integrata soltanto se le funzioni F e G sono note. Le soluzioni dell'equazione di questo tipo, cioè la determinazione del movimento che ne scaturirà in ogni dato caso, saranno differenti, in dipendenza delle cosiddette condizioni iniziali dell'integrazione, cioè la posizione iniziale del segmento, determinata dall'angolo articolare α_0 e la velocità angolare iniziale $\frac{d\alpha_0}{dt}$. Alterando queste condizioni iniziali in vari modi, possiamo ottenere effetti molto differenziati del movimento, della stessa legge che lo governa (3), per le stesse funzioni F e G.

Deve essere notato, prima di tutto, che l'equazione (3) porta direttamente al carattere ciclico della relazione tra il movimento del muscolo F e la posizione del segmento α . Il segmento cambia la sua posizione in seguito all'azione su di esso esercitata dal momento F e questo momento, a sua volta, cambia, in seguito ai cambiamenti dell'angolo α . In questo modo si genera una ciclica catena di causa ed effetto. Questa catena sarebbe idealmente ciclica, qualora il momento (equazione

(1)) dipendesse unicamente da α e $\frac{d\mathbf{a}}{dt}$, cioè se il movimento fosse completamente passivo (per esempio, la caduta del braccio). Ma, come nelle equazioni (1) e (3) riportate sopra, il valore di F dipende pure dal grado dell'eccitazione del muscolo E .

Appare evidente che si presentano due possibilità: o il grado dell'eccitazione E dipende interamente o parzialmente dai valori di α e $\frac{d\mathbf{a}}{dt}$, oppure è completamente indipendente da loro ed è unicamente una funzione del tempo t .

La scelta, tra le due possibilità indicate, è chiaramente di grande significato fisiologico, come sarà dimostrato, con sufficiente evidenza, soltanto nella successiva discussione su questo intervento. Per il momento, indicherò soltanto alcune delle conseguenze di ciascuna delle ipotesi sollevate.

Se il grado dell'eccitazione E è semplicemente una funzione della posizione e della velocità e non una funzione del tempo, allora l'equazione (3) prenderà la forma di una classica equazione differenziale:

$$I \frac{d^2 \mathbf{a}}{dt^2} = F \left[E \left(\mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt} \right), \mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt} \right] + G(\mathbf{a}) \quad (3a)$$

gli integrali parziali della quale dipenderanno soltanto dalle condizioni iniziali. In questo caso, conseguentemente, un movimento potrà avvenire se saranno soddisfatte (dall'esterno) le richieste condizioni iniziali e, una volta iniziato, proseguirà con la stessa ininterrompibile regolarità con la quale un elastico oscilla, se teso ad una lunghezza iniziale precisamente determinata e poi rilasciato. E' evidente che questa ipotesi non può corrispondere alla realtà fisiologica (del muscolo N.d.T.), perché essa, in effetti, ignora completamente il ruolo del sistema nervoso centrale.

D'altro canto, si può supporre che il grado di eccitazione E sia un valore che cambi con il tempo e dipenda interamente da una predeterminata sequenza di impulsi derivanti dal sistema nervoso centrale, con nessuna relazione con le condizioni locali agenti sul sistema del segmento in movimento.

Se, come nell'ipotesi formulata sopra per l'oscillazione di un elastico teso, il muscolo può essere paragonato ad una sorta di molla indipendente o nastro di gomma, allora, in questa seconda ipotesi, esso può essere rappresentato come una sorta di dinamo che attrae il suo cilindro interno soltanto in funzione del potenziale della corrente elettrica che viene fornita alla spirale da una fonte esterna.

La legge della variazione di questa corrente deve essere rappresentata nel sistema dell'equazione (3) come una funzione del tempo; infatti, qualsivoglia possa essere la causa reale di queste variazioni, i cambiamenti stessi vengono presentati al sistema

(3) in una forma completamente finita ed indipendente, come dati assolutamente inalterabili. L'equazione (3), in questo caso, prende la forma:

$$I \frac{d^2 \mathbf{a}}{dt^2} = F \left[E(t), \mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt} \right] + G(\mathbf{a}) \quad (3b)$$

che non consente alcuna concreta soluzione (perché E(t) resta indeterminato in quanto dipende dalla volontà, N.d.T).

E' importante qui richiamare l'attenzione su quanto segue: malgrado il fatto che il livello di eccitazione E, come è stato ipotizzato, sia indipendente da α e da $\frac{d\mathbf{a}}{dt}$, il momento del muscolo F è dipendente da essi come prima. Mentre, come abbiamo dimostrato sopra, l'operatività di questo momento, cioè, l'intera figura del decorso di un movimento, varierà in funzione delle condizioni iniziali, che in nessun modo entrano nell'espressione per il grado di eccitazione E e, conseguentemente, in nessun modo potranno influenzare il corso del suo svolgimento nel tempo.

Consegue da ciò che i risultati generali delle interazioni che scaturiscono dall'equazione (3b) non possono essere previsti o regolati in anticipo, perché i cambiamenti nell'eccitazione saranno implicati nel gioco delle forze e delle dipendenze che in nessun modo alterano il proseguimento di questi cambiamenti, seguendo una legge completamente indipendente. I movimenti che vengono regolati dalla legge espressa dall'equazione (3b) saranno necessariamente atassici (disordinati, cioè privi di coordinazione, N.d.T.). E così non rimane che l'ipotesi che l'eccitazione di un muscolo E debba essere considerata tanto una funzione del tempo, quanto una funzione della posizione e della velocità e che l'equazione (3) possa essere descritta nella forma:

$$I \frac{d^2 \mathbf{a}}{dt^2} = F \left[E \left(t, \mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt} \right), \mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt} \right] + G(\mathbf{a}) \quad (3c)$$

Questa deduzione puramente analitica della consistenza funzionale dell'eccitazione muscolare consente una traslazione nell'ambito fisiologico eccezionalmente semplice. La dipendenza della variabile E dal tempo, partendo dall'assurdità dell'ipotesi espressa nell'equazione (3a) (che cioè l'eccitazione E non sia una funzione del tempo, ma soltanto della posizione e della velocità, N.d.T.), sottolinea la necessità che i cambiamenti nell'eccitazione siano direttamente suscitati dall'attività delle aree motorie del sistema nervoso centrale.

La dipendenza dell'eccitazione dalla posizione del segmento α e dalla sua velocità angolare $\frac{d\mathbf{a}}{dt}$ rappresenta il ben noto riflesso propriocettivo della fisiologia.

Ne consegue che entrambe, la posizione e la velocità, direttamente ed indipendentemente, influenzano i cambiamenti nel grado dell'eccitazione dei

muscoli ed in realtà entrambi questi effetti sono stati oggetto di precise investigazioni fisiologiche.

Volgendoci all'evidenza clinica, possiamo dire che l'equazione (3a) rappresenta l'espressione del movimento di un segmento nel caso di una paralisi centrale, mentre l'equazione (3b) rappresenta l'espressione del movimento in caso di atassia (disordine, N.d.T.) propriocettiva.

Con questi ragionamenti, abbiamo stabilito, nelle equazioni fondamentali del movimento, una sovrapposizione di due connessioni cicliche di ordini differenti e relativi a differenti argomenti.

La prima connessione ciclica è la mutua interazione della posizione α e del momento F ed esiste puramente meccanicamente, come è stato indicato sopra. La seconda connessione, costruita sulla prima, è un'interazione simile tra la posizione α (e dunque la velocità) ed il grado di eccitazione E ; questa connessione è generata attraverso sistemi di riflessi ed è collegata all'attività del sistema nervoso centrale.

Il significato generale e principale da trarre dalle considerazioni di cui sopra può essere agevolmente dedotto.

La abituale vecchia rappresentazione, implicitamente accettata e, fino ad ora, fatta propria da parecchi fisiologi e clinici, descrive l'articolazione scheletrica come completamente passiva sotto il controllo degli impulsi nervosi centrali ed inequivocabilmente sottomessa a questi impulsi.

In tale rappresentazione, l'impulso centrale a produce sempre il movimento A e l'impulso b produce sempre il movimento B .

Da ciò, è facile dedurre che la rappresentazione delle aree motorie della corteccia cerebrale possa essere paragonata ad una tastiera con i relativi tasti.

Tuttavia, l'equazione (3b) indica che lo stesso impulso $E(t)$ (ignorando la periferia) può produrre effetti completamente differenti, a causa del gioco reciproco delle forze esterne ed a causa delle variazioni nelle condizioni iniziali. L'equazione (3c) dimostra, d'altro canto, che un determinato effetto è possibile, per un movimento, soltanto nel caso in cui gli impulsi centrali E siano molto differenti, in differenti condizioni, rappresentando una funzione delle posizioni e delle velocità dei segmenti ed operando molto diversamente nelle equazioni differenziali che presentino diverse condizioni iniziali.

Parodiando il ben noto aforisma sulla natura (natura parendo vincitur, N.d.T.), si può dire che *motus parendo vincitur* (il movimento è realizzato ubbidendogli).

Deve essere sottolineato, infine, che il campo delle forze esterne non consiste solamente della forza di gravità $G(\alpha)$ e può sempre accadere che quest'ultima espressione non entri affatto nell'equazione fondamentale, in tale semplice forma. Poiché la gravità, necessariamente, influisce sulla posizione e sulla velocità di un

sistema come quello scheletrico e poiché, di norma, la posizione e la velocità influiscono sui cambiamenti di E, possiamo dire che il termine parendo (obbedendo, N.d.T.), relativamente agli impulsi centrali, deve qualche volta intendersi in senso molto ampio.

Questa obbedienza si intende come un adattamento a tutte le forze, interne ed esterne, che agiscono sul sistema, mentre le forze che non dipendono direttamente dall'azione dell'impulso E possono frequentemente giocare un ruolo decisivo sul bilancio generale delle forze agenti sul movimento.

In tali casi (Fig. 1), se per un dato movimento i cambiamenti richiesti delle forze, all'articolazione, sono rappresentati dalla curva B e le forze risultanti nel campo esterno sono rappresentate dalla curva A, allora il sistema nervoso centrale sarà obbligato a fornire soltanto la frazione addizionale C, così che la sequenza degli impulsi non possa mantenere neppure la più lontana corrispondenza con i contorni della curva B e frequentemente una ancor minore corrispondenza con questa curva, che con i cambiamenti nel campo esterno A.

Questi impulsi supplementari e compensativi talvolta appaiono in modo indiretto durante le osservazioni ciclogrammetriche. E così, senza entrare nei dettagli discussi negli studi menzionati sopra, si può dire che:

- a) una relazione univoca tra gli impulsi ed i movimenti non esiste e non può esistere;
- b) la relazione tra gli impulsi ed il movimento è tanto più distante dall'inequivocità¹, quanto più complessa è la catena cinematica implicata nel movimento che viene considerato;
- c) i movimenti sono possibili soltanto nelle condizioni della più accurata ed ininterrotta concordanza – imprevedibile in anticipo – tra gli impulsi centrali e gli eventi che accadono alla periferia e sono frequentemente quantitativamente meno dipendenti da questi impulsi centrali, che dal campo delle forze esterne.

2.2 L'integrità e la complessità strutturale del movimento biologico.

Nel tesoro di conoscenze accumulato dalla fisiologia sperimentale, vi sono vaste raccolte di osservazioni e fatti, che caratterizzano il decorso di un singolo impulso o di più semplici modelli di impulsi nervosi.

Vi sono parecchi dettagliati studi su tutti gli aspetti dell'eccitazione, dell'inibizione, della parabiosi², della cronassia³, ecc., per un singolo "decorso" nervoso. Tuttavia,

¹ Per un'equivocità si intende una indubitabile relazione lineare diretta tra causa ed effetto (N.d.T.).

² In biologia, vita di due organismi artificialmente uniti (N.d.T.).

possediamo attualmente soltanto due direzioni lungo le linee di ricerca sul modo generale di operare degli impulsi nervosi:

- il principio di reciprocità di Sherrington⁴ ed
- il principio della dominanza di Uchtomskij⁵.

Ma anche questi gruppi di dati sono molto lontani dagli interessi che muovono i nostri studi – i problemi delle strutture dei movimenti, come formazioni integrali. E', tuttavia, proprio questa integrazione dei movimenti che rappresenta la più importante caratteristica implicata nella coordinazione motoria. L'evidenza di questa integrazione può essere investigata in parecchie situazioni sperimentali e significative connessioni e correlazioni vengono osservate, in tutti questi casi, tra le varie componenti dei processi integrati. Il fenomeno più semplice e più facilmente osservabile, in questa categoria, è l'apparire di una graduale e fluida redistribuzione delle tensioni nelle masse muscolari, che viene espressa, in modo particolarmente evidente, nei casi di movimenti filogeneticamente antichi o altamente automatizzati. Un muscolo non entra mai in un movimento completo come un elemento isolato. Neppure l'attivo aumento di tensione, né la concomitante (reciproca) inibizione nei sottogruppi antagonisti⁶ sono, di norma, concentrati in una singola entità muscolare anatomica; piuttosto, vi è un graduale e armonico passaggio da un sistema agli altri. Suggerirei un breve esperimento: distendete il braccio anterolateralmente e descrivete un grande cerchio con la mano, come illustrato nella Fig. 2 e poi cercate, attraverso un'analisi anatomica, di evidenziare come il cambiamento nell'innervazione muscolare ed il processo dell'inibizione nei gruppi muscolari antagonisti siano conseguiti durante questo movimento. Esattamente il medesimo processo di graduale trasferimento dell'innervazione può essere chiaramente osservato in qualsiasi movimento plastico; con più appropriati mezzi di registrazione, ciò può essere osservato come un fenomeno generale.

L'integrazione discussa sopra è tanto più chiaramente dimostrata nell'analisi dei movimenti ritmici automatici, dall'apparire di reciprocità estremamente marcate nell'interrelazione delle componenti.

³ Tempo minimo necessario di durata di una corrente, affinché la stimolazione di un nervo raggiunga la contrazione di un muscolo (N.d.T.).

⁴ Ch. S. Sherrington (1857-1952). Il riflesso è il processo fondamentale che coordina, nello spazio e nel tempo il comportamento degli animali e dell'uomo, in risposta agli stimoli ambientali (N.d.T.).

⁵ A. A. Uchtomskij (1875-1942). Scopri il fenomeno della dominanza di un centro della corteccia cerebrale su altri, come attrattore dell'eccitabilità e rafforzamento dell'inibizione (N.d.T.).

⁶ Il concetto di antagonismo può essere applicato incondizionatamente soltanto a casi di muscoli che operano su articolazioni con un singolo asse di rotazione e successivamente a quelli che agiscono soltanto su di un'articolazione. Il numero di muscoli di questo tipo è estremamente ridotto. Nelle estremità scheletriche troviamo esempi di questo tipo soltanto nei muscoli del braccio e nel vasto femorale. Tutti gli altri muscoli sono antagonisti soltanto funzionalmente, in ogni singola situazione, presentando differenti relazioni in differenti situazioni.

Ho descritto esempi di tale reciprocità in altri studi (2, 5). Intendo riferirmi, in quest'occasione, puramente al fatto che, nel lavoro ritmico con un martello, la direzione della traiettoria del gomito (frontale e laterale) presenta una stretta correlazione con fenomeni apparentemente lontani dal gomito, come la relazione delle velocità massime della testa del martello nei movimenti di battuta e sollevata del martello stesso, l'angolo di inclinazione del martello rispetto all'orizzontale, nella sollevata, la relazione tra la lunghezza delle traiettorie del martello e del polso ed altre. Mi sembra che gli effetti dei cambiamenti sul ritmo e l'intera costruzione del movimento siano qui rilevanti, come ho discusso in altri studi (3, 5) sulla tastiera e sulla locomozione.

Un movimento non risponde mai a cambiamenti dettagliati, con un cambiamento nei dettagli: il movimento risponde come un intero a cambiamenti in sue piccole parti e tali cambiamenti sono particolarmente prominenti in fasi e dettagli talvolta considerevolmente distanti, tanto spazialmente, quanto temporalmente da quelli inizialmente incontrati.

Infine, è necessario commentare il fatto al quale ho dedicato l'attenzione in altri studi (3, 4, 5 e 6) e cioè che il corso dei movimenti ritmici degli esseri viventi può essere presentato nella forma di una serie rapidamente convergente di funzioni trigonometriche.

Sono stato in grado di dimostrare che una diversità dei movimenti ritmici umani (la marcia, la battuta con il martello, il movimento del limare, la suonata al piano, ecc.), possono essere interpretati, con un'accuratezza di pochi millimetri, nella forma della somma di tre o quattro oscillazioni armoniche, le così dette somme trigonometriche di Fourier⁷:

$$r = A_0 + A_1 \sin \frac{2\mathbf{p}}{T}(t + \Theta^1) + A_2 \sin \frac{4\mathbf{p}}{T}(t + \Theta^2) + A_3 \sin \frac{6\mathbf{p}}{T}(t + \Theta^3) + \dots$$

La rapidità della convergenza di queste somme può essere considerata dagli esempi numerici riportati nella Tabella 1.

Il fatto che una tale interpretazione sia possibile è di grande importanza per la questione in discussione. Se un ciclo completo di un movimento dura 1 secondo ed in questo caso può essere rappresentato con un'accuratezza di 1-3 millimetri, come la somma di tre sinusoidi, ciò significa che tutti i dettagli di questo movimento devono essere stati organizzati, con il richiesto grado di accuratezza, un intero secondo prima. Per di più, essendo noto il suo periodo, la sinusoide viene determinata da due parametri, cioè può essere rappresentata da due punti.

La somma di quattro sinusoidi può allora teoricamente essere determinata da otto punti; in altri termini, è possibile ricostruire, da una piccola sezione di un

⁷ J. B. I. Fourier (1768-1830). Matematico francese. Il teorema qui ricordato sostiene che qualsiasi funzione periodica può essere considerata come la somma di armoniche (N.d.T.).

movimento del tipo che abbiamo rappresentato, dell'ordine dell'uno per cento, nella forma della somma di quattro sinusoidi, l'intero movimento come un tutto, con lo stesso ordine di accuratezza. Questo fatto sperimentale dimostra l'interazione organizzativa e la mutua reciprocità dei movimenti ritmici, nel mentre la mutua interdipendenza tra gli elementi del movimento che ho studiato (il battere con un martello) suggerisce una simile interazione, in termini di componenti spaziali.

Se l'espressione esterna dell'attività coordinativa fornisce un quadro di tale elevato grado di reciprocità ed interrelazione, allora, d'altro canto, la sua struttura anatomica, in termini relativi alla nostra attuale conoscenza, fornisce analogamente un quadro di non minore complessità organizzativa.

L'estrema varietà di studi clinici di danno all'area motoria suggerisce che un gran numero di differenti, subordinati e variamente interagenti sistemi cooperano per rendere possibile un movimento nella sua interezza. Il solo sistema spinale contiene più di cinque vie centrifughe indipendenti (piramidale, retrospinale, vestibolospinale e due vie tettorali).

Nella regione corticale, vi è un gran numero di centri che, in un modo o nell'altro, sembrano (per lo più da riscontri patologici) essere necessarie componenti di un movimento generale. Tutti i tentativi di descrivere la loro attività sono necessariamente limitati, attualmente (1935, N.d.T.), a definizioni molto generalizzate, ed a descrizioni ipotetiche; tuttavia, non vi è dubbio sulla loro attività sintetizzante. Per esempio, i tentativi di molti Autori⁸, di descrivere, in un modo o nell'altro, le interazioni funzionali di varie parti della corteccia cerebrale devono essere riconosciuti, con l'attestazione del grande servizio reso da questi Autori alla fisiologia dell'attività motoria. Un breve sommario di ciò che tali Autori hanno scoperto sulle tematiche che direttamente riportano all'attività motoria può essere approssimativamente così sintetizzato.

Un impulso che raggiunge le terminazioni nervose finali, in un muscolo, dalle fibre centrifughe dell'ultimo neurone, è la risultante di un'intera serie di impulsi centrali separati, che raggiungono le sinapsi del corno anteriore attraverso differenti percorsi. Tra questi percorsi, si deve riconoscere la significativa indipendenza innervazionale degli impulsi piramidali (il tratto cortico-spinale) e gli impulsi combinati provenienti dai gruppi dei nuclei striopallidali, che sono in stretta cooperazione con centri le cui relazioni funzionali risultano meno apparenti (sostanza nigra, nucleo di Dorsale, corpus Luysi, ecc.).

Gli impulsi centripeti propriocettivi danno luogo ad impulsi effettori di risposta dal cervelletto e da molte altre stazioni, che sono in relazione con il midollo spinale attraverso il sistema quadrigemino.

⁸ Tra i quali, è da menzionare particolarmente Lashley (N.d.T.).

Infine, il ruolo decisivo, nella produzione del movimento, deve essere assegnato non ad un sistema centrifugo, bensì ad un sistema centrale-informativo (la fisiologia dei tempi andati l'avrebbe denominato commissurale-associativo) che si realizza in un gioco scambievole lungo le linee dei percorsi frontali pontocerebellari.

Dovrebbe essere possibile elencare le caratteristiche generali delle peculiarità funzionali di ognuna di queste stazioni anatomiche (spesso, i dettagli forniti da diversi Autori sono contraddittori), ma non è questo l'intendimento di questo studio. Qui è importante sottolineare una singola peculiarità comune a tutte queste caratteristiche e che è stata accertata come un dato indiscutibile, negli ultimi 20 anni.

Tutte le osservazioni cliniche sopra riferite, come quelle di molti altri Autori, concordano con la posizione (completamente diversa da quella dei fisiologi del secolo scorso), che questi sotto-sistemi nervosi centrali abbiano lo stesso referente periferico – gli stessi muscoli e, più probabilmente, gli stessi percorsi periferici. Le incompatibilità e le differenze, nell'operatività dei sistemi piramidale, striopallido, cerebellare ed altri, non risiedono nelle differenze e nelle peculiarità degli obiettivi periferici sui quali essi agiscono, bensì soltanto nelle differenze delle forme nelle quali queste influenze vengono esercitate.

Il pallidum agisce sulla stessa muscolatura sulla quale agisce la corteccia cerebrale; non è l'obiettivo, bensì il modo dell'eccitazione che è specifico. Nessuno dei dati raccolti dalle ricerche fisiologiche contemporanee è in disaccordo con la plausibilità del fatto che, per esempio, tanto la flessione, quanto l'estensione, in ogni articolazione, possa essere ottenuta tanto con il sistema piramidale, quanto con quello striopallido; entrambi questi sistemi producono un effetto reciproco. Nei casi di gravi patologie, i due sistemi agiscono separatamente, mentre in condizioni di normalità entrambi cooperano in un processo ritmico.

A conferma di come questa cooperazione possa aver luogo, vi sono molte osservazioni e riflessioni persuasive e generalmente non contraddittorie.

Ciò che appare essere comune a tutte queste descrizioni in generale non è importante; l'importanza risiede nel fatto che la tendenza generale riscontrata in tutte queste investigazioni riporta sempre al riconoscimento della presenza comune, in tutti i casi, di una operatività peculiarmente qualitativa dei subsistemi centrali, nei confronti di uno stesso obiettivo periferico.

Aderente a queste considerazioni è il quadro, attualmente stabilito, della molteplicità delle proiezioni di organi periferici nel sistema nervoso centrale. Lungo le linee della conoscenza eccezionalmente dettagliata della proiezione corticale della periferia motoria, che già nel 19° secolo era oggetto di studio e che, attualmente, ha avuto un grande impulso (Fig. 3), si è costretti ora ad ipotizzare proiezioni localizzate della stessa periferia, tanto sul globus pallidus, quanto sul verme del cervelletto.

Non è importante, per i nostri propositi, sapere in quale modo o per quale via questa molteplicità si sia formata, se come il risultato di una stratificazione filogenetica o per sovrapposizione. Nell'essere umano, essa si presenta come un dato obiettivo, cioè come un problema, ed il nostro compito risiede nella ricerca di spiegazioni non contraddittorie dei meccanismi che stanno alla base di tale funzionamento pluripiano.

Se tentiamo un esame, dal punto di vista di tale molteplicità, dell'equazione del movimento elementare riportata in (3c), si giunge necessariamente alla seguente conclusione: un impulso nervoso E che, come appare da un'attenta disamina dei processi periferici, non è relazionato in una maniera univoca alle sue conseguenze, cioè al movimento che produce, ed è perciò ristretto alla più precisa concordanza tra la sua evoluzione e la segnalazione propriocettiva per α e $\frac{d\mathbf{a}}{dt}$, è allo stesso tempo la somma di (oppure è in qualche altra forma di rapporto collegato relazionata a) una serie di impulsi che hanno punti di origine molto differenziati nel cervello.

Ciascuno di questi impulsi nasce in un'area separata del cervello, distinta dagli altri centri. Ciascuno di questi centri ha i suoi particolari collegamenti con gli altri centri, i suoi particolari gradi di collegamento, nella forma e nel tipo delle connessioni e, finalmente, come dimostrano le osservazioni cliniche nella patologia nervosa, il suo particolare modo di operare nel tempo ed i suoi particolari mezzi di interazione.

La difficoltà di coordinare tutti questi fatti è molto grande, come sarà tentato di mostrare. Se l'impulso E seguisse il modello descritto nell'equazione (3b), cioè se avesse la forma $E(t)$, non sarebbe in principio difficile rappresentare una serie di sorgenti indipendenti (restando inteso che tra loro vi fosse un elevato grado di accordo), che infine si unissero in un comune singolo decorso nervoso, in un nervo motorio che trasmettesse il risultato della loro comune azione $E(t)$ fino alla placca motrice. Nella stessa maniera, non dovrebbe risultare difficile concepire la possibilità di un'azione multipla di impulsi, nel caso in cui la forma assunta fosse quella corrispondente all'equazione (3c) e cioè $E\left(t, \mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt}\right)$, se ognuno dei differenti impulsi avesse il proprio particolare oggetto di eccitazione alla periferia (nella forma, ad esempio, di un particolare muscolo, controllato da quell'impulso e soltanto da quello). Se si suppone, ad esempio, che il controllo di un gruppo di flessori dell'articolazione sia concentrato, come origine, nel centro A del cervello ed il controllo degli estensori della stessa articolazione nel centro B, mentre le connessioni propriocettive assicurano la possibilità, per entrambi i centri, di reagire ad α e $\frac{d\mathbf{a}}{dt}$, allora il meccanismo sarebbe, in tal caso, puramente comprensibile con considerazioni esclusivamente di ordine quantitativo e non qualitativo. La situazione, invece, è tale, come abbiamo visto, da non consentire una soluzione così

semplice della questione, cioè si è di fronte ad un sistema di impulsi che non presentano una corrispondenza univoca con il movimento, controllato dalla propriocezione con impulsi inviati all'oggetto da una molteplicità di centri di origine.

L'unica (apparentemente) possibilità di spiegazione, per una struttura di questo tipo, risiede nel riferire la "percezione" propriocettiva soltanto ad uno dei centri effettori del cervello, ad esempio, al cervelletto e supporre che gli altri effettori funzionino puramente, in accordo con il tipo $E(t)$.

L'espressione matematica di una tale struttura può essere considerata nel seguente modo: la somma degli impulsi E è composta da una serie di impulsi centrali E_1, E_2, E_3, \dots

$$E\left(t, \mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt}\right) = E_1(t) + E_2(t) + \dots + E_n\left(\mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt}\right) \quad (5)$$

Tuttavia, questa combinazione si dimostra inaccettabile, per un buon numero di ragioni. Infatti, non vi è alcuna garanzia che E sia la somma di E_1, E_2, \dots, E_n e non, invece, un'altra funzione di un loro assemblaggio: il che altererebbe considerevolmente la questione e complicherebbe – per il centro E_n – la coordinazione, escludendo alcuni impulsi con una aggiunta corrispondentemente proporzionale di altri, ritenuti più adeguati; gli impulsi centripeti sono diretti al midollo spinale non utilizzando un solo canale, ma attraverso una molteplicità di canali, raggiungendo almeno due nuclei centrali con percorsi diretti, nel cervelletto e nel talamo, raggiungendo un'ulteriore serie di aree con percorsi indiretti.

Il problema sta precisamente nell'interpretazione della possibilità della molteplicità propriocettiva. Visualizzare questo fatto è così difficile come immaginare un tandem ciclistico, sul quale sono seduti due ciclisti, ognuno dei quali abbia a disposizione un suo proprio ed indipendente scambio. E' chiaro che la presenza di due manubri indipendenti rappresenta l'esistenza di due centri effettori, che rispondono alla immissione propriocettiva soltanto se vi è la coordinazione più stretta possibile tra di loro.

Non si nega né che la possibilità di tali connessioni esista, né che esistano in realtà. L'intento è quello di indicare le enormi difficoltà che si incontrano nel tentativo di fornire una spiegazione funzionale della coordinazione dei movimenti. Appare già dall'analisi dell'equazione (3c) che la nostra comune ed usuale modellizzazione dell'interazione tra il centro e la periferia è troppo semplice, e qualitativamente insostenibile, per spiegare la coordinazione motoria. Quando, poi, si è costretti a ritenere la complessa interazione tra centri e periferia, come il risultato della mutua attività di interi sistemi di organi che, anatomicamente e clinicamente, rivelano gradi variabili di indipendenza, allora, la grande complessità strutturale si rivela in tutta la sua ampiezza. Tuttavia, ciò è utile, perché il fallimento, nel superamento della

difficoltà di risolvere un problema, frequentemente non è altro che uno sprone alla sua chiarificazione.

2.3 L'interrelazione tra coordinazione e localizzazione.

La discussione precedente ha già largamente rivelato la stretta connessione tra i problemi della coordinazione e della localizzazione.

Risulta evidente, da quanto esposto, che nessuna sfumatura, gradazione, di un singolo impulso $[E(t)]$ può servire come spiegazione neppure del più semplice caso di svolgimento di movimenti automatici ed ancor meno come una spiegazione della complessità dimostrata dai movimenti svolti da parecchi muscoli, ognuno dei quali richiede il controllo da parte di parecchi centri.

Per fare una digressione, si può affermare: all'inizio, partendo dall'indubitabile presenza di connessioni funzionali "interdipartimentali" tra centri dell'encefalo, che li organizzano secondo un ordine gerarchico (Uber-und Unterordnung), si otterrebbe il seguente schema innervazionale, per gli impulsi effettori (Fig. 4).

Appare evidente che la coordinazione è determinata non tanto da differenze nell'effetto di ciascun impulso Aa, Ab, ... Ba, Bb, ... preso separatamente, ma anche dal modo sistematico della loro comune operatività e dagli effetti prodotti sull'articolazione.

Il termine coordinazione suggerisce un'azione comune di elementi separati. La soluzione del problema della coordinazione non risiede nell'analisi del tono e delle risorse espressive di un singolo strumento, in un'orchestra, ma nella costruzione tecnica della partitura e nella maestria del direttore.

Le linee generali basilari del ragionamento, nello studio sulla coordinazione, dovrebbero essere formulate nel modo seguente: la coordinazione è un'attività che garantisce ad un movimento l'omogeneità, l'integrazione e l'unità strutturale, che è stata ricordata in precedenza. Quest'attività si basa principalmente non su particolari processi in singoli neuroni, ma su una determinata organizzazione della loro comune attività. Questa organizzazione deve necessariamente riflettersi sul piano anatomico, in forma localizzata, cioè nella localizzazione. Questa sembra essere una maniera estrema, un espediente per formulare la questione della coordinazione.

Da un lato, l'organizzazione, e le forme nelle quali si evidenzia, dovrebbe essere rappresentata nelle forme strutturali della localizzazione. Nello stesso modo nel quale si può derivare, dall'esame del diagramma di un circuito elettrico, l'idea della natura della sua funzione, così i dati sulla localizzazione anatomica e sul tipo dell'anatomia presentati, possono servire, almeno, come evidenza circostanziata dei

nuovi problemi sperimentali che sono stati avanzati e che potrebbero essere denominati la fisiologia strutturale del movimento.

Dall'altro lato, tale analisi strutturale dei movimenti dovrebbe essere di considerevole aiuto, nella valutazione critica delle concettualizzazioni esistenti e future sul tipo e la struttura della localizzazione cerebrale. E' impossibile visualizzare una situazione nella quale la struttura localistica contraddicesse l'organizzazione strutturale.

A questo punto, dovrebbe essere fatta una riflessione pertinente.

La topografia è la geografia del cervello, lo studio della distribuzione spaziale dei suoi punti funzionali.

La localizzazione è il piano strutturale delle interrelazioni anatomiche tra i punti funzionali.

Se nella Fig. 4 spostiamo la posizione dei centri A, B, C, D ed E, ciò cambierà l'intero quadro topografico, ma non altererà la loro struttura localizzativa. La distribuzione (topografia) degli elementi in un diagramma di un sistema radio-ricevente sono completamente differenti dalla loro topografia in un sistema ad apparato costruito da questo disegno. D'altro canto, per una singola disposizione topografica sono possibili schemi completamente differenti.

La Fig. 5 rende chiara l'ultima affermazione, nei riguardi dei diagrammi a circuito, che risulta estremamente conveniente per illustrare il problema: il diagramma (a) ed il diagramma (b) hanno esattamente la stessa struttura, ma differenti topografie.

Il problema che aveva ossessionato i fisiologi del passato, cioè l'inversione dell'immagine retinica, ed in particolare se l'inversione fosse trasmessa nella stessa maniera alla corteccia e come venisse raddrizzata, appare ora un problema elementare ed ingenuo.

Ricordiamo ancora alcune delle ipotesi avanzate per spiegare il fenomeno e cioè che l'anima fosse localizzata nel cervello con i piedi in alto e la testa all'in giù, senza, tuttavia, determinare più precisamente se l'anima avesse o no i piedi. Ora, si ipotizzano, con grande facilità, trasposizioni molto più complesse di elementi, nella rappresentazione retinica della corteccia, senza incontrare difficoltà strutturali da questo fatto. Infatti, in una stazione telefonica centrale, ad esempio, non ci meravigliamo se il commutatore che collega regioni settentrionali o meridionali di una città abbia una corrispondente disposizione spaziale sul pannello. Tuttavia, questa vecchia questione permette ora una nuova e meno ingenua formulazione. Vi sono però dei limiti in questo tipo di trasposizione? E se esistono, quali sono i confini che separano trasposizioni che non cambiano la struttura, da quelle che inevitabilmente la distruggono?

Un'analisi del problema, quando viene posto in questi termini, evidenzia che differenti schemi possono dimostrare differenti gradi di tolleranza alla trasposizione e ne spiegheremo i motivi più avanti.

Perciò, sul problema della localizzazione non diviene importante, ai fini della presente discussione, dove precisamente nella corteccia venga riflesso un oggetto o una funzione periferici, bensì che cosa sia rappresentato e come e quali siano le caratteristiche distintive di questi oggetti, che vengano rappresentate negli emisferi corticali e nei centri sotto corticali.

I problemi topografici sono, per la maggior parte, non collegati, non relazionati all'analisi della struttura coordinativa dei movimenti, mentre i problemi della localizzazione sono di significato essenziale.

Questo significato può essere molto ben chiarito riprendendo l'esempio della vecchia concezione localizzazionistica, già menzionato al paragrafo 1.

Questa concezione risponderebbe perfettamente alla realtà, se ogni impulso centrale incondizionatamente governasse un singolo determinato movimento, cioè se esistesse una corrispondenza puntuale tra gli impulsi ed i movimenti. In questo caso, gli impulsi effettori sarebbero in grado di operare semplicemente come una funzione del tempo $E(t)$, dando sempre lo stesso effetto, indipendentemente da ciò che accade in periferia; il modello corticale corrispondente ad una tastiera d'organo risponderebbe bene, come esempio chiarificatore di questa ipotesi.

Tuttavia, questa corrispondenza uno ad uno (un centro corticale – un'attività periferica, N.d.T.) non esiste e l'area motoria cerebrale organizza le risposte aggiustandosi abilmente e bilanciandosi tra i risultati delle forze esterne (periferiche) e gli effetti delle forze di inerzia, reagendo costantemente ai segnali propriocettivi, con la simultanea integrazione degli impulsi provenienti da diversi subsistemi centrali, così che dieci successive ripetizioni dello stesso movimento richiedono dieci successivi impulsi, tutti diversi l'uno dall'altro. La presenza, nella corteccia cerebrale, di strutture localizzative come quelle suggerite da Hitzig e Förster⁹ sembra, a questo punto, un'interpretazione molto improbabile.

Vorrei richiamare qui il fallimento, nel 1923, dell'invenzione della “sinfonia di fischi”.

Un tentativo di convertire fischi di vapore in uno strumento musicale, tramite una tastiera d'organo, è fallito perché ogni dato fischio non può essere collegato allo stesso suono, in ogni occasione, come le note musicali, perché il relativo tono variava con la pressione del vapore, in funzione del numero di fischi prodotti simultaneamente, con il grado di impedimento della canna a vapore, ecc.; così diventava impossibile ottenere una corrispondenza univoca, uno ad uno, tra la tastiera (i vari tasti), da una parte, e le frequenze dei toni ottenuti, dall'altra.

⁹ Cfr. n. 7 della bibliografia, (N.d.T.).

E' ovvio che una dichiarazione di complessità o di "impraticabilità", da un certo punto di vista, non può essere ritenuta un argomento decisivo per l'accettazione o il rifiuto di un'ipotesi fisiologica. Non vi è alcuna ragione di supporre che la struttura fisiologica debba essere massimamente razionale, secondo il nostro punto di vista antropomorfo tecnico-sociale. La struttura localistica della corteccia, secondo lo schema di Föster (Fig. 3), non contraddice direttamente l'equazione (3c), con il suo ciclo propriocettivo e la sua mancanza di relazioni semplici del tipo uno ad uno; essa rende soltanto il problema del funzionamento dei suoi centri cellulari estremamente difficile a comprendersi.

L'argomento decisivo contro la teoria della diretta rappresentazione del sistema muscolare nella corteccia deriva da un altro, forse inatteso, dato. Lo presento nella sua più generale formulazione nel corso di questo studio, riservandomi qui di illustrare soltanto uno dei suoi effetti.

Immaginiamo che le cellule (i neuroni, N.d.T.) del gyrus centralis¹⁰ siano, in realtà, il centro effettore dei muscoli. Supponiamo anche che l'attività di questi neuroni sia (come è inevitabile, nell'ipotesi data) nettamente differente, da un istante all'altro, nella molteplice ripetizione di un dato movimento, nei cambiamenti del campo delle forze esterne e nei segnali propriocettivi. Se supponiamo, per chiarezza, di poter rappresentare ogni neurone nella corteccia, quando agisce sulla muscolatura in senso eccitatorio, come l'accendersi di una lampadina elettrica, quando il suo impulso viene trasmesso alla periferia, allora, l'effettuazione di ogni movimento diviene visibile, sulla superficie della corteccia, come una scarica a zig-zag. L'assenza di una corrispondenza uno ad uno e tutte le considerazioni che sono state descritte sopra, come conseguenze dell'equazione (3c), divengono ovvie in questo caso, perché ad ogni ripetizione dello stesso movimento, la scarica a zig-zag diviene visibilmente differente. Ora, supponiamo che questo movimento ripetitivo rappresenti un gesto automatizzato, la realizzazione di un movimento abitudinario, cioè, un riflesso condizionato.

Dalla discussione sopra riportata, deriva l'inevitabile conclusione che il riflesso condizionato motorio opera, e si costituisce, ogni volta su di un nuovo zig-zag, cioè con l'intervento di nuovi neuroni.

In altri termini, si giunge alla conclusione che l'ipotesi della localizzazione neuronale dei muscoli porta necessariamente alla negazione della localizzazione neuronale dei riflessi condizionati. Una delle due ipotesi, a questo punto, deve essere sacrificata: o la corrispondenza uno ad uno, tra neurone ed attività muscolare, viene respinta ed in questo caso cade l'ipotesi dei riflessi condizionati localizzati neuronalmente, oppure viene accettata l'ipotesi localizzazionistica. Certamente, non è pensabile di eliminare in un solo colpo il vecchio concetto

¹⁰ Trattasi di particolare struttura del cervello (N.d.T.).

localizzazionistico; tuttavia, non è possibile ignorare il fatto che questo concetto si presenta messo in dubbio da molti punti di vista.

Gli esperimenti di Betlie¹¹ e di Trendelenburg sull'estirpazione di tessuto corticale, nelle scimmie, hanno indicato la possibilità di estese compensazioni ma, ancor di più, le ampie investigazioni effettuate da Lashley¹² sui topi rilevarono l'apparizione di compensazioni ed il ristabilimento di riflessi condizionati, per i più diversi e topograficamente differenti luoghi dell'estirpazione, avanzando la molto persuasiva evidenza che fosse necessario un radicale riesame delle vecchie concezioni localizzazionistiche.

Lashley non poté scoprire alcuna chiara relazione tra il luogo topografico delle aree che egli distruggeva nel cervello ed il grado al quale i riflessi condizionati potevano essere ristabiliti; al contrario, egli riscontrò esservi una forte correlazione tra il tempo richiesto per il ristabilimento del riflesso e la quantità di sostanza cerebrale rimossa, senza alcuna referenza alla sua localizzazione.

Questi risultati lo portarono ad essere favorevole ad una teoria che sostenesse non esservi alcuna individualità cortico-neuronale nell'operazione, a me sembra, sbagliando.

I suoi dati sono estremamente dannosi per la vecchia teoria localizzazionistica, ma non riescono a demolire il concetto localizzazionistico in termini generali.

L'errore di Lashley elimina l'opposto errore fatto da Gall ai suoi tempi. Nessuno ora crede più che la frenologia sia stata condannata, perché il principio della localizzazione corticale fosse risultato errato. Nessuno ritiene che la teoria di Gall sia stata abbandonata, perché egli non fosse riuscito ad individuare, nel cervello, i luoghi ove hanno reale sede le aree dell'avarizia o dell'ambizione.

La teoria di Gall è caduta non per non aver saputo individuare le aree, bensì per i principi con i quali quell'Autore ha scelto le categorie alle quali pensava di assegnare una localizzazione discreta nella corteccia.

Le categorie suggerite da Fritsch, Hitzig, Förster ed altri sembrarono più appropriate fisiologicamente e più prossime alla realtà, delle fantasie di Gall, impregnate del moralismo razionale del 18° secolo. Tuttavia, l'evidenza che si è accumulata contro di esse, inevitabilmente oggi ci porta a proporre il loro abbandono, ma ciò non è ancora sufficiente a giustificare l'abbandono del principio della localizzazione, in generale.

¹¹ Cfr. n. 6 della bibliografia, (N.d.T.).

¹² Lashley Karl Spencer (1890-1958). Psicologo allievo di Watson. Si occupò soprattutto delle funzioni cerebrali dimostrando, contrariamente a quanto sostenuto dalla teoria delle localizzazioni, l'indipendenza di alcune funzioni, della particolare area corticale utilizzata (N.d.T.).

Deve essere ricordato, infatti, che, immediatamente dopo l'abbandono della frenologia, l'idea della localizzazione apparve compromessa per lungo tempo, finchè non si ritenne di riprenderla, con la cognizione del concetto dei riflessi condizionati, che implicava il suo riaffermarsi. Ora, con la messa in discussione della localizzazione specifica dei riflessi condizionati, si giunge all'affermazione che la natura della localizzazione è assolutamente oltre la (attuale possibilità di, N.d.T.) comprensione.

Il nostro proposito sperimentale, attualmente, risiede nella corretta formulazione delle categorie che siano realmente rappresentate nei centri del cervello. La chiave di questa ricerca deve necessariamente consistere in un'analisi strutturale che comprende: il momento recettivo, come appare negli esperimenti con i riflessi condizionati; il momento effettore, come appare nella coordinazione dei movimenti.

2.4 Euforia (Emissione) degli engrammi di movimento

In questo studio, mi occupo soltanto di quei fenomeni che si riferiscono alla natura momentanea ed estensivamente strutturata della coordinazione dei movimenti.

Mi sembra importante dimostrare che un movimento non potrebbe essere capito in termini di alcune sfumature nell'operatività di un singolo impulso, bensì che esso è il risultato dell'operatività, simultaneamente cooperativa, di interi sistemi di impulsi, mentre la struttura di questo sistema – il suo schema strutturale – è importante per la comprensione del risultato.

Vi è soltanto un piccolo passo da fare per andare, da questo punto, all'argomento centrale di questo studio, che sostiene essere l'innervazione e la localizzazione di questa struttura non soltanto non contraddittoria con la struttura osservabile dei movimenti dell'organismo, ma anche con la necessità di un'esatta rappresentazione di questi ultimi.

Per proseguire, è ora necessario affrontare il fenomeno da un altro punto di vista, quello, cioè, della sua durata temporale. E' indispensabile chiarire sperimentalmente se esiste un semplice parallelismo tra la durata di una serie di impulsi relazionati al sistema o se vi sia una coordinazione temporale della medesima mutua interdipendenza strutturale, come è stato descritto sopra, per ogni separato momento della forza. Questa formulazione del problema può essere chiarita dalla seguente illustrazione. Per conseguire una data coordinazione in un determinato momento, viene proposto lo schema (a) (per esempio, quello illustrato nella Fig. 6).

E' possibile ritenere tutte le coordinazioni su tutte le possibili durate temporali come ininterrotti funzionamenti dello schema (a), oppure esistono e possono essere visti come una sequenza di cambiamenti dello schema (a) in qualche altro schema,

qualitativamente diverso da esso (schema (b) e poi schema (c), schema (d) e così via), mentre la legge della transizione da uno schema all'altro ed il loro ordine di transizione, a sua volta, ha la sua propria determinata configurazione strutturale?

I nostri dati su questo problema sono estremamente scarsi, ma alcune osservazioni possono ancora essere fatte.

Primo, dobbiamo ritornare ai fatti sopra descritti, sull'omogeneità di un movimento e sulla sua unità, in termini di interrelazioni delle sue parti in senso spaziale e temporale. Avendo stabilito il nostro modello di un movimento ritmico, nella forma di una serie trigonometrica a tre, quattro termini, del tipo dell'equazione (4), è possibile provare, oltre ogni dubbio, che questa omogeneità esiste pure nel tempo e che questa particolare omogeneità è, infatti, non periferica o meccanica, bensì originaria nell'operatività del sistema nervoso centrale. Ciò dimostra che esiste, nel sistema nervoso centrale, un'esatta formulazione del movimento (Bewegungsformeln) o il suo engramma¹³ e che questa formulazione o engramma contiene, in qualche forma di traccia cerebrale, l'intero processo del movimento, nel suo completo decorso temporale.

Possiamo affermare che quando il movimento inizia vi è già, nel sistema nervoso centrale, un'intera collezione di engrammi, che sono necessari per portare il movimento alla sua conclusione. L'esistenza di tali engrammi è provata dal fatto che esistono abitudini motorie e movimenti automatizzati.

Ora sorge un problema di notevole significato strutturale. Supponiamo che, ad un determinato movimento coordinato, corrispondano nel cervello n engrammi, per mezzo dei quali viene assicurato che il movimento avrà luogo con successiva emissione, in una determinata sequenza temporale e con una determinata cadenza e ritmo.

Tutti questi n engrammi esistono nel sistema nervoso centrale, in ogni dato momento, poiché esiste l'abitudine motoria, ma essi esistono in una maniera nascosta, in forma latente. Come possiamo spiegare il fatto che:

- primo, essi non sono sottoposti tutti dall'emissione (ecforia) simultaneamente, bensì in successione?;
- secondo, essi non perdono il loro ordine di emissione (ecforia)?; e
- terzo, essi riflettono determinati intervalli di tempo, tra ecforia (cadenza) e relazioni quantitative, nella loro durata (ritmo)?

Vi sono qui due possibilità basilari, due "strutture temporali":

¹³ Termine coniato da R. Semën (pronuncia Semion), per designare la registrazione di uno stimolo da parte del protoplasma (N.d.T.).

- a) o ogni successiva euforia dell'engramma (o forse un segnale propriocettivo del suo effetto alla periferia) serve come emettitore, per il successivo engramma, nell'ordine;
- b) oppure, il meccanismo per l'emissione, l'emettitore, si trova fuori dagli engrammi stessi e dirige il loro ordine di intervento attraverso un principio gerarchico di ordine superiore (Überordnung). La prima ipotesi può essere denominata l'ipotesi "a catena"; la seconda, l'ipotesi "a pettine" (Fig.6).

Molto pertinenti considerazioni possono essere fatte a sostegno di entrambe queste ipotesi.

L'ipotesi "a catena" porta al precitato momento propriocettivo e, in questa connessione, chiarisce – indipendentemente e soddisfacentemente – l'osservazione sulla scansione e sul ritmo, riferendoli ad una regolare sincronia con gli eventi che accadono alla periferia.

Poiché, in quest'ipotesi, lo stimolo per attivare ogni successiva emissione è l'esistenza della precedente, è possibile spiegare tanto il mantenimento di un ordine di successione, quanto l'impossibilità di escludere separati collegamenti, dalla successione delle emissioni che avvengono in questo modo.

Infine, l'ipotesi si sostiene sulla sua semplicità e sul fatto che non è necessario postulare alcuna particolare struttura, per l'emettitore.

Gli argomenti in favore dell'ipotesi "a pettine" non sono meno persuasivi.

La presenza, nel sistema nervoso centrale, di un "piano del movimento", l'omogeneità della sua formula e l'omogeneità del movimento stesso e del suo decorso, dall'inizio alla fine, non risponde all'ipotesi che un movimento sia frazionato in questo modo o che non vi sia un principio guida della successione, tra gli elementi del tipo a catena, altro che gli eventi alla periferia.

Non vediamo, in questo caso, alcun segno di un principio guida che unifichi il tutto.

Inoltre, se richiamiamo i fatti discussi in precedenza, che indicano che gli impulsi centrali si aggiustano meramente sul (e compensano il) campo delle forze esterne, così che lo schema degli impulsi nel tempo può avere molto poco in comune con la configurazione del movimento, l'ipotesi a pettine trova un nuovo ed importante sostegno.

Nello stesso tempo, uno sguardo alla Fig. 1 indica che l'impulso centrale C, che viene rappresentato nella figura da un'area tratteggiata (ed è interamente differente all'equilibrio ritmico conseguito con l'integrazione B, raggiunto in seguito alla presenza delle forze esterne disturbanti, A), dimostra una successione di elementi che in nessun caso si rassomigliano l'uno all'altro. La possibilità di ottenere l'omogeneità e la regolarità di B in ogni ripetizione, concordando con la periferia,

secondo la legge espressa nell'equazione (4), necessariamente comporta l'esistenza, nel sistema nervoso centrale, di qualche tipo di engramma guida, che comprenda l'intera regolarità della successione di B. Se un engramma guida di questo tipo esiste (possiamo riferirci ad esso come all'immagine motoria di un movimento), deve avere una duplice natura: deve possedere potenzialità, in qualche modo, simili all'embrione in un uovo, che contiene in forma unica e simultanea le potenzialità del futuro essere che ne sortirà, oppure come la registrazione su un disco di un'intera sequenza, che racchiudano l'intero schema del movimento, come si verrà sviluppando nel tempo; deve garantire, pure, l'ordine ed il ritmo della realizzazione dello schema. Cioè, la registrazione su disco deve avere una sorta di motore, che faccia girare il disco. Per proseguire nella metafora, ciò che viene designato come registrazione su disco o su nastro è l'engramma che dirige e ciò che è stato designato come motore, che muove il disco o il nastro, è l'emettitore¹⁴.

Entrambe le ipotesi che sono state esaminate sono completamente legate alla struttura dell'impulso periferico, che abbiamo dedotto sopra nei termini dell'equazione (3c), cioè la sua dipendenza dalla forma $E\left(t, \mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt}\right)$: esse illustrano soltanto questa dipendenza in modi diversi.

Nell'ipotesi "a catena", gli agenti critici che determinano lo sviluppo del processo sono la dipendenza di E da \mathbf{a} e $\frac{d\mathbf{a}}{dt}$, cioè le loro relazioni propriocettive, mentre il momento temporale della relazione con t è determinato, in questo caso, solamente dal ritmo e dal mantenimento di ogni elemento individuale della catena a, b, c (Fig. 6).

Nell'ipotesi "a pettine", d'altra parte, la relazione dominante è $E(t)$, cioè l'iniziativa indipendente e l'attività regolativa del sistema nervoso centrale, e gli effetti propriocettivi giocano un ruolo puramente correttore dell'intero insieme.

Non dovrebbe essere dimenticato che l'ipotesi della necessità di un meccanismo effettore, distinto dagli engrammi stessi e, in un certo senso, dominante gli stessi, non è necessariamente riferita all'ipotesi "a pettine", ma diviene necessaria per entrambe le ipotesi, in egual misura.

Tanto che ci si riferisca all'engramma regolativo nell'ipotesi "a pettine", quanto agli engrammi elementari a, b, c, ... nell'ipotesi "a catena", essi sono tutti ugualmente

¹⁴ È interessante qui notare che la questione sollevata dell'emissione dei movimenti in un modo "a catena" o "a pettine", è la ripetizione, in termini nuovi, nel campo della fisiologia del movimento, di un'antica disputa psicologica dell'associazionismo (Bleuler, Adler) contro l'azionismo (Berze), su come i processi psicologici si svolgano. Il modello "a catena" corrisponde al concetto sostenuto dagli associazionisti ed il modello "a pettine" è molto simile all'ipotesi di Berze. Io non sono un partigiano di quest'ultima posizione, in favore delle sue profonde basi idealistiche (la psicologia del volontarismo), ma non posso negare che gli attacchi rivolti alle opinioni avanzate dai puri associazionisti sono estremamente opportuni.

organizzati per contenere, in forma latente, l'impulso E in dipendenza non soltanto di a e $\frac{da}{dt}$, bensì anche di t . Non vi è differenza se il meccanismo centrale del ritmo – il motore della rotazione del disco o dello scorrimento del nastro – è relazionato, nella sua azione, alla durata delle reazioni intercellulari psico-chimiche o ad alcuni altri ritmi fisiologici¹⁵. Essi devono, in ogni caso, esistere come funzioni che differiscono dalla collezione di engrammi che esse attivano, perché il tempo reale non può essere incorporato in questi ultimi.

Una decisione tra alternative, in favore dell'una o dell'altra di queste due ipotesi, oppure in favore di qualche altra più complessa sintesi organizzativa, che le incorpori entrambe, è un obiettivo di ulteriori ricerche.

Presentemente, è importante scoprire che cosa, in principio, sia implicato nell'attuale maniera nella quale il problema viene posto. Ciò che sembra importante è ritenere che l'immagine del movimento (che i neurobiologi definiscono "il programma del movimento", "la formula motoria", "la forma del movimento" e così via) deve necessariamente esistere nel S.N.C. nella forma di un engramma. Questo engramma direzionale non esiste propriamente nell'ipotesi "a pettine"; infatti, il semplice fatto di connessioni successive "stampate" tra gli engrammi elementari a, b, c, d, e, \dots nell'ipotesi "a catena", è proprio l'engramma nell'altro schema, soltanto che in questo caso esso è rappresentato da una freccia, piuttosto che da un cerchio; è l'engramma che determina la legge della successione sistematica delle emissioni (ecforie) e che, conseguentemente, le controlla.

Quest'immagine motoria corrisponde alla forma reale, fattuale, del movimento, cioè alla curva B della Fig. 1 e non certo alla curva C dell'impulso; è altrettanto vero che la sua presenza rende possibile controllare il decorso dell'impulso C, così che, come risultato, si ha un'armoniosa prestazione motoria rappresentata da B.

E' necessario, perciò, che esista, nel supremo organo nervoso (il cervello), una rappresentazione esatta di ciò che più tardi accadrà alla periferia, mentre si attua lo svolgersi del movimento esterno, negli intervenenti stadi operazionali, e si realizza l'impulso C, il quale, per la ragione proposta sopra, è conformemente dissimile dall'effetto periferico, deve essere, perciò, anche dissimile dai contenuti degli engrammi di controllo.

Possiamo usare la seguente metafora: avviene come se un ordine inviato da un centro superiore fosse codificato prima della sua trasmissione alla periferia, così da diventare completamente irricognoscibile ed in periferia fosse di nuovo automaticamente decifrato.

¹⁵ Per esempio, la velocità della dispersione delle onde di eccitazione attraverso il S.N.C.; fenomeni temporali relazionati all'interferenza di queste onde; attività ritmica del cuore; ecc.

Nella terza sezione, è stato affermato che la possibilità di una abitudine motoria, cioè dello stabilirsi di un riflesso motorio condizionato, necessariamente implica la sua localizzazione unitaria nelle aree centrali e che una unità di questo tipo non può essere relazionata alla teoria della rappresentazione di muscoli, nei centri più elevati della corteccia.

Le considerazioni appena espresse ancora una volta confermano questa tesi, in quest'occasione, dal punto di vista della struttura temporale dei movimenti; il livello che nel S.N.C. contiene la formulazione dell'impulso centrifugo C e nel quale può essere ritenuta trovarsi una rappresentazione del sistema muscolare, non è il livello più elevato del S.N.C., bensì il livello nel quale sono collocati gli engrammi elementari a, b, c, ..., ecc., dell'ipotesi "a pettine".

Tra i meccanismi rappresentati nell'ipotesi "a pettine" ed il meccanismo coinvolto nella rappresentazione muscolare, si è obbligati ad inserire un altro processo di codificazione dell'immagine del movimento e della sua presentazione nella forma C.

Nei termini della nostra equazione, questo processo di codificazione consiste nella trasformazione della relazione $E(t)$ nella pura forma prevalente nelle sedi più elevate, in dipendenza completa dalla forma $E\left(t, \mathbf{a}, \frac{d\mathbf{a}}{dt}\right)$; cioè l'adattamento dell'impulso alla propriocezione¹⁶.

In questo modo, l'analisi del decorso del movimento nel tempo, ancora ci porta al riconoscimento della complessità strutturale di un atto motorio e, conseguentemente, pure alla complessità della sua rappresentazione, in termini di localizzazione.

Qui, pure, il riconoscimento della necessità dell'esistenza di engrammi direzionali e meccanismi di emissione (ecforia) richiede che venga postulata una serie di livelli gerarchici, ognuno dei quali, inevitabilmente, presenti un grado di indipendenza qualitativa.

¹⁶ La formazione e lo sviluppo di nuove abitudini motorie, cioè l'iscrizione di riflessi condizionati di movimento, dunque, sembra essere un complesso processo strutturale, alla luce dell'analisi intrapresa in questa trattazione. E' il caso, infatti, in cui nuovi engrammi direzionali, con i loro dettagli spaziotemporali, devono essere edificati nel S.N.C.; tuttavia, questi meccanismi ausiliari propriocettivi, che sono stati appena descritti come "codificazione" dell'impulso e che consentono agli engrammi più elevati la possibilità di una dettagliata ed attuale esistenza, devono essere pure edificati. Il fatto che l'abitudine motoria non sia l'iscrizione in quei centri, nei quali sono rappresentati i muscoli localmente, viene ancora dimostrata dal fatto che un'abitudine acquisita può esistere, mentre sono incorporati muscoli molto differenti, in varie combinazioni. Quando un bambino impara a scrivere, egli è in grado di formare soltanto lettere grandi, mentre un adulto, che ha scritto per tutta la vita, può formare tanto lettere grandi, quanto piccole, con eguale facilità e scrivere tanto di fronte, quanto lateralmente, ecc. Apparentemente, gli engrammi motori direzionali vengono sviluppati, parlando generalmente, in una fase più tarda, rispetto ai meccanismi ausiliari di codificazione e corrispondono ad un grado superiore di maestria, nell'acquisizione di un'abitudine.

2.5 Topologia¹⁷ e metrica dei movimenti. Il campo motorio

Se volgiamo la nostra attenzione, dalla prospettiva temporale a quella spaziale, diviene necessario soffermarci su due considerazioni: la distinzione tra le proprietà metriche e topologiche dello spazio fisiologico e le peculiarità del campo motorio del sistema nervoso centrale. Per la loro fondamentale importanza, questi due punti dovrebbero essere, in realtà, l'oggetto di due distinte trattazioni. Per questa ragione, discuteremo di questi argomenti insieme, soltanto per quanto sarà necessario allo sviluppo delle nostre tesi fondamentali.

In ogni rappresentazione geometrica si deve fare una distinzione tra topologia e metrica.

Per topologia di un oggetto geometrico si intende la totalità delle sue peculiarità qualitative, senza alcuna referenza alla grandezza, alla forma, a qualsiasi distorsione della sua riproduzione, ecc. Come proprietà topologiche di una figura lineare, ad esempio, possiamo discutere se è chiusa o aperta, se le linee che la compongono si intersechino l'una con l'altra, come nella figura che riproduce un otto, o se non si intersecano, come nel caso del cerchio; e così via. Accanto a queste proprietà, nella determinazione delle quali le considerazioni quantitative risultano irrilevanti, si possono pure considerare tali proprietà topologiche come incorporanti il concetto di numero, non, tuttavia, includenti il concetto di misura. Tra queste proprietà, possiamo riferirci, per esempio, a quelle della quadrangolarità, all'appartenenza al gruppo delle stelle a cinque punte; e così via. Descriverò arbitrariamente questo gruppo di proprietà, come proprietà topologiche di primo ordine, mentre le prime possono essere considerate proprietà di ordine zero. Tutte le figure della riga superiore della Fig. 7 appartengono ad una ed alla stessa classe topologica di figure del primo ordine (essendo, tuttavia, completamente diverse, secondo le relazioni metriche); esse sono, infatti, identiche rispetto ai numeri che le caratterizzano. Tutte hanno cinque angoli o punte, tutte presentano cinque intersezioni delle linee che le compongono; e così via. Il numero 6, nell'illustrazione, appartiene invece ad un'altra classe dello stesso ordine, contenente quattro angoli ed una intersezione, ma è collocata, come sono le prime cinque figure, nella classe di ordine zero, perché è una figura chiusa, con linee intersecantesi. Per illustrare le proprietà caratteristiche del primo ordine con un esempio, con il quale siano tutti familiari, evidenzierò che ogni lettera stampata rappresenta una classe topologica separata del primo ordine.

¹⁷ Il termine "topologia", come viene qui usato, non coincide esattamente con la stretta definizione matematica. In mancanza di un'espressione più adeguata, è stato adottato questo termine per l'insieme delle caratteristiche qualitative delle configurazioni spaziali e della forma dei movimenti, in contrasto con quelle quantitative o metriche. Una più dettagliata spiegazione di che cosa si intenda qui per "topologia", viene fornita nel testo.

Alla singola classe della lettera A appartengono le lettere A di ogni dimensione, scritti, disegni, figure, ecc. (vedi 7-14 nella Fig. 7), sebbene si ignorino certi addizionali dettagli di puro significato calligrafico. Lo schema abituale con il quale un bambino disegna una casa o un volto è pure una determinata classe topologica e nulla di più.

Dopo questa introduzione generale, possiamo passare dalla geometria, alla psicofisiologia. Se rivolgiamo l'attenzione di uno psicologo, o di un insegnante, alla nostra collezione di lettere A della Fig. 7, egli immediatamente rimarcherà che l'intera serie dimostra una caratteristica comune in termini del suo segno essenziale, cioè, detto senza circonlocuzioni, che le caratteristiche topologiche di una figura sono di somma importanza psicologico-pedagogica, in confronto alle proprietà di tipo metrico. Il nostro psicologo, o insegnante, sarà completamente nel giusto, perché il riconoscimento della lettera A non richiede la presenza di alcuna proprietà metrica ma, al contrario, dipende interamente dalla presenza di determinati spunti topologici. Questa grande affinità tra il processo del riconoscimento e la topologia, che è stata pure notata e studiata, per un certo tempo, dagli aderenti alla psicologia della forma (gestalt), è certamente un fenomeno psicofisiologico e può anche essere di significato biologico generalizzato, ma in nessun caso può essere dedotto da considerazioni esclusivamente geometriche (dal calcolo, N.d.T.).

La caratteristica biologica della predominanza delle categorie topologiche su quelle metriche può essere riscontrata in una molteplicità di esemplificazioni. Una foglia di acero si differenzia da una foglia di betulla per proprietà topologiche di prim'ordine, mentre, contemporaneamente, tutte le foglie di acero appartengono alla stessa classe topologica, nonostante tutte le variazioni biometriche riscontrate tra una specie e l'altra.

La struttura del cervello e la disposizione delle maggiori circonvoluzioni della corteccia di nuovo forniscono un esempio di un oggetto con la stessa topologia, per tutte le possibili variazioni metriche.

E' possibile affermare, con certezza, che – nel campo della morfologia biologica – quei casi nei quali la metrica è importante con la topologia (per esempio, la lente dell'occhio) sono una rarità e rappresentano un'eccezione¹⁸. Questa soverchiante importanza della topologia, nel mondo dei viventi, dovrebbe attentamente essere paragonata, ad esempio, con la morfologia dei cristalli, dove le relazioni essenziali sono quelle metriche.

Un'intera serie di importanti segni morfologici di carattere biologico deve essere inconfutabilmente riferita alla topologia, sebbene questi segni non possano essere di ordine metrico, che assegni loro un'importanza di significato quantitativo.

¹⁸ Non attraversa mai la mente di un anatomico o di un anatomico topografico, che – per tutta la sua vita – egli ha considerato esclusivamente categorie topologiche.

Ogni bambino riesce, naturalmente, a distinguere un cane da un gatto; la distinzione non viene certamente fatta in base a considerazioni anatomiche, come la comparazione fra le strutture delle mandibole e tra i denti, sui quali argomenti non può avere alcuna cognizione, bensì sull'apparenza generale – su di un certo non so che – che indubbiamente appare essere una categoria topologica. Tuttavia, la differenza tra l'apparenza di un cane e di un gatto non può essere demandata a segni topologici di primo o secondo ordine (ad una valutazione quantitativa, N.d.T.). Si potrebbe pensare che alcuni livelli più elevati di analisi possano essere individuati, nel futuro, per ordinare anche la categorizzazione topologica (N.d.T.). Per lungo tempo, è stata rivolta un'insufficiente attenzione al fatto che i movimenti degli organismi viventi, in un grado non inferiore alle loro percezioni, vengono determinati da categorie topologiche. Ciò è illustrato con grande chiarezza nell'esempio del disegnare, forse perché questo tipo di movimento lascia una registrazione che può venir convenientemente studiata. E' facile, per ognuno, disegnare una stella a cinque punte, ma possiamo affermare con certezza che questa figura è costruita soltanto con l'utilizzazione di relazioni topografiche e non metriche. Come prova, suggerisco di disegnare 10 stelle in successione e di paragonarne le figure. Io dubito che sia possibile riscontrare in queste figure una copia perfetta tra due, dal punto di vista metrico, senza l'ausilio di un righello e di un compasso. Si vuole dire che il sistema motorio umano non può conseguire alcun elevato grado di abilità metrica, ma può essere affermato che il nostro sistema motorio è molto sensibile a distinzioni topologiche molto raffinate e certamente intraducibili in differenziazioni di ordine quantitativo, come possono essere quelle tra 0 e 1. E' sufficiente, ad esempio, porre attenzione allo scrivere a mano.

Ho sottolineato sopra che la lettera A appartiene ad una singola classe topologica, indipendentemente da come o da chi venga scritta. Oltre a ciò, tutte le lettere A scritte dalla mia mano sono simili l'una all'altra, ma simultaneamente diverse dalle lettere A scritte da una seconda e da una terza persona

La similitudine tra le mie lettere A non è certamente metrica, bensì topologica; le differenze tra le mie lettere A e quelle scritte da altre mani devono essere relazionate, allo stesso modo, a differenze di ordine topologico, coinvolgenti livelli di differenziazione di ordine più elevato di quello che rende simili le mie lettere A. Le inclinazioni topologiche nella nostra percezione si basano su ciò che può essere ritenuto come comune modello o sembianza, entro i limiti di una data scrittura a mano – ancora una volta nella forma di un'analisi non facile, in termini di impressioni – un non so che, la cui analisi non è ancora da noi esperibile, per la nostra mancanza di dimestichezza attuale con tutto ciò che può costituire più elevati livelli topologici e su quali proprietà possano essere ascritte a tali livelli.

Quei movimenti che non lasciano una traccia sulla carta hanno richiamato meno attenzione, nella maniera indicata. Parallelamente alla conoscenza sulla scrittura manuale, vi sono similari conoscenze, dal punto di vista strutturale, sul passo

(andatura), sul tocco nella musica e sull'accento della voce, sebbene l'analisi di questi fenomeni non sia stata approfondita molto accuratamente. Una cosa, tuttavia, può essere già affermata con certezza; tutti i tentativi di tradurre distinzioni di questo tipo in termini di segni metrici quantitativi (come può essere fatto, per esempio, con l'intonazione), sono destinati al fallimento in partenza. Qui si rende necessario effettuare nuove scoperte nella geometria qualitativa, ma considerare le prospettive che si aprono in questa direzione sarebbe, al momento, troppo estraneo all'obiettivo di questo studio.

Una circostanza di grande ed immediato interesse, nell'analisi strutturale dei movimenti, è il fatto che le peculiarità topologiche della percezione visiva presentano marcate similarità con alcuni segni di idiosincrasie nella topologia dell'organizzazione motoria. Così, ad esempio, la categoria della dimensione è ugualmente indifferente alla percezione visiva ed al movimento. Io trovo ugualmente facile riconoscere un triangolo, una stella o una lettera, tanto che venga presentata in un'ampia oppure ristretta dimensione. La stessa indifferenza per le dimensioni assolute di una figura geometrica è stata rilevata da Pavlov nei cani e da Lashley nei topi. Precisamente nello stesso modo, si riscontra ugualmente facile disegnare una stella o scrivere una parola in dimensioni ampie o ridotte e farlo su di un pezzo di carta o su di una lavagna.

Sarebbe interessante fare uno studio sulle relazioni quantitative tra la variazione in questi disegni e la loro dimensione; tuttavia, in ogni caso si può dire che, qualunque sia la dimensione, essi conservano le loro proprietà topologiche non soltanto di primo, bensì anche di più elevato ordine; ad esempio, tutte le caratteristiche della scrittura a mano, peculiari ad una data persona, riscontrabili nella scrittura su di un foglio di carta, appaiono anche quando essa scrive sulla lavagna, quantunque l'intera struttura muscolare dei due movimenti sia completamente diversa.

La percezione visiva, tuttavia, dimostra un'elevata sensibilità per quelle peculiarità che sono anche metriche, per una categoria, cioè, che è completamente ignorata dal sistema motorio. D'altro canto, la categoria metrica dell'estensione è, senza dubbio, di maggiore importanza per i recettori motori che per quelli visivi, perché la stima della dimensione, nella percezione (per esempio, visualmente) è sempre infine basata su associazioni cinestesiche profondamente radicate, riferite al campo di sensibilità del recettore. I sistemi percettivo e motorio sono, in tutta evidenza, ugualmente indifferenti alla categoria della posizione nello spazio (destra, sinistra, sopra, sotto) che, invece, è di estremo interesse per l'analisi strutturale della localizzazione.

Infatti, una figura piazzata nelle più diverse parte del campo visivo viene riconosciuta come identica con eguale facilità¹⁹.

¹⁹ Io considero questo fatto una chiarissima dimostrazione della complessità strutturale di ogni riflesso condizionato, anche il più semplice. Presentando visualmente uno stimolo condizionante ad un cane, né la

Nello stesso modo, il processo di svolgere un'azione abituale, per esempio, scrivere una parola o suonare un brano, che è stato a lungo esercitato al piano, viene compiuto con approssimativamente la stessa facilità e con lo stesso grado di accuratezza, indipendentemente dalla posizione della mano o della tastiera sul piano.

E' interessante notare come le abilità puramente metriche dell'apparato cinestesico (per esempio, la stima della lunghezza o della distanza) siano caratterizzate da grossolane differenze, nelle varie zone del campo spaziale. Tanto il riconoscimento percettivo quanto la riproduzione motoria sono estremamente sensibili all'orientamento di una figura nello spazio.

L'identificazione di un triangolo, dopo la sua rotazione di 180° , è incomparabilmente più difficoltosa dell'identificazione di triangoli di differenti dimensioni, ma identico orientamento. Proprio allo stesso modo, è estremamente difficile disegnare figure capovolte, con una penna. E' molto importante notare come, in un'ampia percentuale di casi, i bambini disegnino le immagini speculari delle lettere, cioè che essi scambino la destra con la sinistra, mentre mai le capovolgono.

Un ulteriore fatto si presenta come molto interessante (perché indicativo di qualche sorta di gerarchia strutturale): i bambini mai leggono o scrivono un'intera parola, da destra a sinistra; lo fanno soltanto separatamente e successivamente con le singole lettere della parola. E' evidente che, in entrambi i casi, debbano esistere differenti meccanismi che non possano essere paragonati l'uno all'altro. Queste analogie e differenze possono essere riportate in ampio numero; uno studio in questo settore dovrebbe rivelarsi molto promettente. Attualmente, tuttavia, è necessario riassumere tutto ciò che è stato esposto in merito alle proprietà topologiche della percezione e dei movimenti.

Prima di tutto, può essere affermato che la totalità delle caratteristiche topologiche e metriche delle relazioni tra i movimenti e lo spazio esterno possono essere generalizzate sotto la denominazione CAMPO MOTORIO, in analogia al concetto del campo visivo, avanzato dagli psicologi.

testa ed ancor meno le pupille risultano immobilizzate e per questa ragione lo stimolo visuale può cadere nei punti più disparati della retina; conseguentemente, su differenti punti del primo centro visivo. Se lo stimolo visivo, per esempio, consiste in un triangolo, ad ogni presentazione dello stimolo alla retina dell'animale, viene eccitata un'intera serie di elementi sensitivi ed ogni volta che l'animale ruota la testa o gli occhi, questa serie è, in parte o completamente, diversa. L'apparire di una singola reazione in tutti questi casi prova che l'engramma per un dato riflesso condizionato non si localizza in questi punti (centro visivo primario) sul quale le linee separate ed i punti sono rappresentati, bensì ad un livello strutturale più elevato, le cui connessioni con il primo sono molto simili a quelle che sono state descritte in precedenza, nel caso dei successivi livelli dei centri del movimento. Qui si riscontra un esempio dello stesso fatto menzionato in precedenza (nella terza sezione), come prova dell'impossibilità della localizzazione dei muscoli e dei riflessi condizionati in uno stesso centro.

Un immediato compito della fisiologia è l'analisi di questo campo motorio. Le precedenti affermazioni consentono di asserire che il campo motorio fisiologico è ampiamente differente dallo spazio esterno oggettivo, come è il campo visivo.

Le differenze tipiche dello spazio teorico euclideo consistono, in primo luogo, in un'ovvia preferenza del campo motorio per le categorie topologiche, in confronto a quelle metriche; nella presenza di alcuni evidenti tropismi o tendenze verso alcune direzioni; nell'assenza della simmetria bilaterale (peculiare al campo visivo), ecc. La predominanza della topologia è rivelata pure dal fatto che le linee dritte e la loro distinzione dalle linee curve non appartengono al (non sono proprie del) campo motorio (in ciò, differisce dal campo visivo), né appaiono stabili e identiche. In biomeccanica, ciò si manifesta nel fatto che movimenti successivi di natura ciclica non si ripetono mai esattamente (Fig. 8).

La rete coordinativa del campo motorio deve essere vista, a differenza di una rete nella geometria euclidea, primariamente come non rettilinea e, secondariamente, oscillante come una ragnatela nel vento. La sua "oscillazione", tuttavia, non procede così in avanti da distruggere le relazioni topologiche tanto di ordine zero (per esempio, la categoria "tra due"), quanto di primo e forse anche più elevato ordine.

Alcune delle proprietà del campo motorio, che abbiamo ora evidenziato, sono di grande interesse per la teoria della localizzazione.

Primo, vi è la indifferenza profondamente radicata, inerente, del centro del controllo motorio, alla scala ed alla posizione del movimento svolto, come abbiamo discusso sopra. E' chiaro che ognuna delle variazioni di un movimento (per esempio, disegnare un cerchio grande o piccolo, direttamente, di fronte o a lato, su di un piano orizzontale o su una lavagna verticale, ecc.) richiede un programma di intervento muscolare completamente differente e, per di più, coinvolge, nell'azione, un gruppo di muscoli completamente diverso.

La facilità e l'accuratezza quasi uguali, con le quali possono essere effettuate tutte queste variazioni, evidenzia che sono tutte, in ultima istanza, determinate da uno stesso engramma direzionale di ordine elevato, in relazione al quale dimensioni e posizione giovano un ruolo secondario. Questi engrammi, che determinano la struttura muscolare di ciascuna delle concrete variazioni, chiaramente stanno in sottordine a quelli descritti nella 4^a sezione ed in particolare nell'area C della Fig. 1, poiché gli engrammi relativi alla dimensione ed alla posizione spaziale possono già essere riferiti all'area B.

Si può concludere, da tutto ciò, che l'engramma più elevato, che può essere denominato l'engramma di una data classe topologica, è già strutturalmente molto lontano da ogni somiglianza a qualunque schema articolare e muscolare (ed a causa di ciò anche, probabilmente, molto distante in senso localistico); esso è

estremamente geometrico, rappresentando una immagine motoria dello spazio molto astratta.

Tutto ciò fa supporre – anche se attualmente rappresenta soltanto un’ipotesi, che tuttavia è molto plausibile – che le aree localizzative di questi engrammi motori di ordine elevato, abbiano pure la stessa regolazione topologica, che viene riscontrata nello spazio esterno o nel campo motorio (e che, in ogni caso, lo schema non è quello che rispecchia l’apparato muscolo-articolare). In altri termini, vi sono molte ragioni per sostenere che nei centri motori più elevati del cervello (è molto probabile che questi si trovino negli emisferi corticali) lo schema localizzativo non sia altro che qualche forma di proiezione dello spazio esterno, come si presenta al soggetto nel campo motorio.

Questa proiezione, per tutto ciò che è stato sopra riportato, deve essere congrua con lo spazio esterno, ma soltanto topologicamente, non metricamente. Tutti i danni provenienti dal considerare la possibilità di una compensazione, come accade per la retina, per l’inversione della proiezione (sezione 3) e molte altre evenienze dello stesso tipo, sono completamente esclusi dalle considerazioni topologiche sopra riportate. Mi sembra che, sebbene attualmente non sia possibile specificare le vie attraverso le quali la rappresentazione topologica dello spazio venga ottenuta nel S.N.C., questa sia soltanto, per la fisiologia, una questione di tempo. E’ soltanto necessario ripetere che le proprietà topologiche della proiezione dello spazio nel S.N.C. possono rivelarsi molto strane ed inattese; non dobbiamo aspettarci di trovare, nella corteccia, una specie di fotografia dello spazio, sebbene deformata.

Tuttora, l’ipotesi che nei livelli più elevati del S.N.C. esistano proiezioni dello spazio e non proiezioni delle articolazioni e dei muscoli, mi sembra attualmente più probabile di ogni altra.

2.6 Il principio di “eguale semplicità”

Ed ora è venuto il momento di dare una formulazione generale di un principio euristico, che è stato già presentato parzialmente nella precedente terza sezione e di esaminare la sua applicazione con pochi esempi. Verrà denominato il principio di eguale semplicità

Inizio con esempi non fisiologici.

Con tre attrezzi sono in grado di disegnare un cerchio: una sagoma, un compasso ed un ellissografo. Un cerchio dello stesso raggio della sagoma può essere disegnato con uguale facilità con la sagoma e con il compasso; un cerchio può pure essere disegnato con l’ellissografo, perché il cerchio è un caso particolare dell’ellisse, ma l’operazione è un po’ più complicata di quella che impiega la sagoma o il compasso.

Se si vuole un cerchio di raggio diverso, la sagoma diviene immediatamente inutilizzabile. Il compasso può disegnare cerchi di qualsiasi raggio, con egual facilità; l'ellissografo può descrivere un cerchio di un determinato raggio e per questa ragione viene scartato, insieme alla sagoma.

Se si vuole disegnare un'ellisse, si può usare l'ellissografo con esattamente la stessa difficoltà che si è presentata per disegnare il cerchio, tuttavia il compasso e la sagoma risultano inutilizzabili.

Nell'esempio, siamo impegnati a considerare un gruppo di curve di secondo ordine che differiscono: (a) nel raggio e (b) nell'eccentricità. Uno degli strumenti, la sagoma, ci fornisce con grande semplicità una sola curva. Il secondo strumento ci consente, ugualmente, facili variazioni nel raggio, ma soltanto un'eccentricità particolare, quella uguale a zero, peculiare al cerchio. Il terzo strumento ci consente, con uguale facilità – sebbene, in termini assoluti, il processo sia leggermente più complicato del caso del compasso – tutte le eccentricità, ma soltanto un raggio.

Un cerchio dello stesso raggio della sagoma può essere disegnato per mezzo di tutti e tre gli strumenti, ma le relazioni funzionali tra le loro semplicità e possibili variazioni sono completamente differenti in tutti e tre i casi.

Il tipo di questa relazionalità funzionale è determinato, con grande accuratezza, dallo schema costruttivo dello strumento. Nel linguaggio matematico, l'esempio precedente può essere presentato nelle seguenti formulazioni.

Si designa il grado di semplicità (per esempio, la velocità con la quale il disegno debba essere compiuto, o l'unità divisa per il tempo, del completamento, ecc.) con S , il raggio del cerchio con r e l'eccentricità con e .

Allora, per tutti gli strumenti,

$$S = F(r, e)$$

Per la sagoma di raggio r si ha:

$$F(r, e) = 0; \quad F(R, 0) \neq 0 \quad (6a)$$

Per il compasso:

$$F(r, e)_{e \neq 0} = 0; \quad F(r, 0) = \text{cost.} \quad 0 \quad (6b)$$

Per l'ellissografo

$$F(r, e)_{r \neq R} = 0; \quad F(R, e) = \text{cost.} \quad 0 \quad (6c)$$

Le equazioni (6b) e (6c) possono essere rappresentate da una linea; l'equazione (6a) è il punto di intersezione delle linee (6b) e (6c).

Sono possibili esempi nei quali il grado di semplicità non cambia bruscamente da zero a qualche valore finale, come nel caso precedente, ma cambia da un valore all'altro con una certa regolare continuità. Così, per esempio, moltiplicando al

calcolatore i numeri, il grado di semplicità (o la velocità del lavoro) decresce parallelamente con l'aumento del numero delle operazioni di moltiplicazione e con il numero delle unità coinvolte in ciascuna di queste operazioni. Allo stesso tempo, il grado di semplicità è invariabile rispetto al numero delle cifre moltiplicate. Nel calcolatore Millioner (macchina calcolatrice disponibile ai tempi di Bernštejn (1935), corrispondente ad un normale calcolatore meccanico digitale, N.d.T.), il grado di semplicità è invariabile rispetto al numero di cifre nei moltiplicatori e dipende soltanto dal numero dei segni di moltiplicazione.

Infine, su di un righello, il grado di semplicità è pressochè invariabile, rispetto ad entrambe le componenti coinvolte.

In tutti questi casi, si incontra lo stesso fatto e cioè che differenti schemi strutturali possono svolgere lo stesso gruppo di operazioni e che le differenze nelle loro strutture sono sempre accompagnate da differenze nella forma della funzione S .

Possiamo dire con certezza che, più marcati sono i cambiamenti in S , nel passaggio da un elemento del gruppo ad un altro del gruppo adiacente, minore risulterà il grado di adattamento a questa transizione, possibile con le peculiarità strutturali del sistema in questione. D'altro canto, per ogni dato sistema, vi sono "linee di eguale semplicità" cioè transizioni da un elemento del gruppo di possibili modalità ad un altro, che non comportino un cambiamento nella semplicità della manipolazione, corrispondente a transizioni che sono più strettamente relazionate allo schema strutturale dell'attrezzo.

Si giunge, da questo caso, alla seguente formulazione del principio di eguale semplicità:

per ogni sistema in grado di intraprendere un gruppo di differenti processi elementari di una certa portata, le linee di eguale semplicità corrispondono a quelle direzioni lungo le quali il movimento non comporta alcun cambiamento né nei principi strutturali, né nei principi operativi del sistema.

Invece dell'espressione "semplicità", che non ha alcuna concreta associazione, si potrebbe inserire un'intera serie di espressioni parallele, in relazione al caso in esame: velocità dell'esecuzione (del compimento del compito); grado di accuratezza; grado di varianza, ecc. Per una formulazione generale, è stato scelto il termine "semplicità" perché è il più generale, malgrado la sua mancanza di concrete associazioni. Si può estrarre un valido principio euristico dalla discussione sopra riportata. Se abbiamo a che fare con qualsiasi sistema dato, la cui struttura sia sconosciuta, ma la cui operatività possa essere osservata in una varietà di condizioni, allora, attraverso un paragone dei cambiamenti nella variabile S (velocità, accuratezza, variazione, ecc.) incontrati come funzione di ciascuna delle variabili, si può giungere alla determinazione di conclusioni sulla struttura del sistema, che risultano inconseguibili attraverso mezzi diretti.

Immaginiamo, per esempio, di essere invitati a vedere un film, senza aver alcuna idea di come la cinematografia operi. Si può supporre di essere in presenza di un teatrino di marionette (come ai tempi dei nostri nonni). Restiamo stupefatti dalla ricchezza e dalla varietà del materiale che stiamo guardando, superiore ad ogni aspettativa, in confronto al teatro di marionette, ma abbiamo un'indiscutibile ragione di ritenere che stiamo osservando marionette che sono state molto migliorate. E' pur vero che in un teatro di marionette non potrebbe, per esempio, mai essere visto il mare; ma ai tempi dei nonni il mare poteva essere rappresentato attraverso un'estremamente ingegnosa imitazione meccanica negli scenari.

Nel vecchio teatro di marionette, le figure non potevano essere diminuite nelle dimensioni, per farle apparire più distanti, mentre nel cinema ciò viene conseguito con, ed attribuito ad, un miglioramento della tecnologia. Nel teatro di marionette, tutto ciò, quantunque estremamente difficoltoso, è tuttavia possibile. Ma è molto facile dimostrare che non stiamo assistendo ad una rappresentazione di marionette, attraverso l'aiuto del principio di eguale semplicità. E' sufficiente, a questo proposito, selezionare due oggetti che sono nettamente differenti nella loro difficoltà di rappresentazione nel teatro di marionette, per esempio, una ruota che gira ed un mare in tempesta, e senza riferimento alla tecnica cinematografica (supponiamo che la sua struttura tecnica sia inaccessibile a noi), rivolgerci al contabile dello studio e chiedergli quanto costerebbe ottenere rappresentazioni di entrambi questi oggetti sul palcoscenico, per un minuto. Appena scopriamo che 20 minuti di film costano circa come ciascun oggetto (oppure, per essere più precisi, che il costo del film è in relazione con altri fattori arbitrari ed in nessun caso alle proprietà meccaniche degli oggetti), l'ipotesi di un teatro di marionette cade.

In generale, un'intelligente intervista con il contabile potrebbe rivelare parecchi dettagli tecnici. Possiamo ricordare che fu proprio in questo modo che Mendeleev scoprì il segreto di un importante esplosivo francese.

Per il teatro delle marionette è possibile tutto ciò che risulta possibile al cinema (almeno potenzialmente). Ma il termine "tutto", in principio, è irraggiungibile con lo stesso grado di semplicità che vige nel cinema. Si riscontrano le stesse relazioni tra il grammofono e quelle macchine parlanti, sperimentate più di cento anni fa da von Kempelin (gli automi, N.d.T.). L'intera natura strutturale del grammofono consiste nel fatto che i suoni che vengono riprodotti sono indifferenti per il grammofono, mentre von Kempelin sarebbe stato obbligato a costruire una nuova gola per ogni nuovo timbro di voce. Nella storia di L. Andreu, un diacono rurale fu portato ad uno scontro estremamente divertente con il principio di eguale semplicità, come viene applicato al grammofono, quando non fu in grado di rendersi conto del perché il grammofono potesse riprodurre, con uguale facilità, una canzone da music-hall e la voce del figlio dell'uomo.

Il principio descritto si rivela estremamente fruttuoso nella sua applicazione all'analisi strutturale della funzione del S.N.C., tanto negli aspetti recettivi, quanto in

quelli esecutivi. Nella 2^a sezione, è stato utilizzato un movimento circolare del braccio esteso, del tipo dimostrato nella Fig. 2, come esempio di un'armonica redistribuzione della contrazione muscolare. Si può considerare lo stesso movimento da un nuovo punto di vista. Se un cerchio viene descritto con il braccio posto frontalmente al corpo, poi direttamente a lato ed infine a metà tra le due posizioni precedenti, entrambi gli schemi del muscolo e dell'innervazione dei tre movimenti risulteranno notevolmente differenti. Tuttavia, tutti e tre questi movimenti sono soggettivamente estremamente simili, in termini di difficoltà ed oggettivamente esplicano approssimativamente lo stesso grado di accuratezza e di variazione. Ciò consente di concludere, con un elevato grado di probabilità, che la struttura del complesso centrale, che governa la produzione di una data serie di movimenti, è molto più strettamente relazionata alla forma spaziale (alla configurazione, N.d.T.), che allo schema muscolare, perché tutte le tre variazioni del movimento circolare che abbiamo esaminato stanno su linee di eguale semplicità, riguardo alle proprietà del movimento ed alle proprietà delle loro configurazioni, ma non riguardo alle proprietà degli schemi muscolari.

Questa conclusione può rendersi più chiara con il seguente esempio, che è stato analizzato in un altro studio²⁰. Per svolgere con precisione qualsiasi movimento automatizzato, ad esempio, lo scrivere a mano con la penna, le posizioni ed i mezzi di fissazione delle articolazioni intermedie del braccio sono quasi completamente indifferenti. Si scrive con la stessa mano, e con pressochè identica facilità, tanto appoggiando l'avambraccio sul tavolo, quanto mantenendolo sollevato, così come in altre posizioni.

Tutte queste varianti sono molto differenti dal punto di vista della struttura muscolare impiegata e, se fosse ritenuto che l'oggetto della produzione di un'abitudine motoria fosse una di queste strutture, saremmo obbligati a supporre che le altre rimanessero completamente estranee a quest'abitudine, cioè un livello di semplicità completamente differente. Il fatto di un'identica semplicità e la ritenzione delle caratteristiche dell'abitudine è un'immediata evidenziazione che lo scrivere a mano non è un'abitudine dello schema muscolare e, conseguentemente, che le tracce nel S.N.C. che governano queste abitudini sono strettamente relazionate alla topologia dello scrivere a mano e considerevolmente lontane dai muscoli e dalle articolazioni. Tutti questi e parecchi altri simili esempi devono essere analizzati sperimentalmente, tanto quantitativamente, quanto qualitativamente, e ciascuna di queste analisi consentirà di giungere a nuove fondamentali conclusioni sulla struttura e sull'attività dei centri motori del S.N.C.

Un esempio estremamente interessante dell'applicazione del principio di eguale semplicità può essere preso dalla psicologia della percezione che è, al momento, molto più sviluppata della fisiologia strutturale del movimento.

²⁰ Cfr. n. 7 della bibliografia (N.d.T.).

L'esempio si riferisce alla teoria dell'udito. Un'intera gamma di ipotesi è stata avanzata per spiegare i meccanismi operativi dell'orecchio interno, che ci consentano di discriminare i suoni (Helmholtz, Ewald, Hering, Gray), tra le quali la più popolare, al momento, sembra quella di Helmholtz.

In quest'ipotesi, ciascuna delle numerose fibre della membrana basilare è ritenuta comportarsi come una striscia elastica, intonata ad una particolare frequenza. Quando questa particolare frequenza agisce sull'organo del Corti e sulla membrana basilare, la data fibra entra in una condizione di oscillazione risonante e, meccanicamente, stimola i recettori uditivi, che sono su di essa. In questo modo, ciascuna delle terminazioni sensitive del nervo acustico è stimolata soltanto da una singola frequenza del suono ed il riconoscimento della frequenza, nel S.N.C., viene conseguito dallo stesso processo che permette la percezione tattile localizzata.

I suoni complessi o le armoniche sono analizzate nello stesso modo che il riconoscimento del timbro e la discriminazione degli accordi. Parecchie serie obiezioni psicologiche sono state sollevate contro questa ipotesi. Addizioni e correzioni furono subito fatte. Helmholtz stesso non fu in grado di spiegare, in questi termini, la percezione della consonanza e della dissonanza, per le quali fu obbligato ad ipotizzare la presenza di un sistema separato che percepisce le battute. Vi sono state numerose, più tardive, aggiunte ed integrazioni (F. Alt; A. Gray; L. Hermann-Waetzmann; Budd-Feldafing; W. Köbler; G. Revesz; F. Brentano ed altri) e la vera causa della loro necessità ha gettato seri dubbi sull'ipotesi di Helmholtz.

E' molto probabile che appaia una nuova ipotesi, in grado di spiegare adeguatamente tutti i requisiti dei fenomeni e che sia, nello stesso tempo, più semplice. Sarebbe preferibile che al vecchio principio fosse sostituita un'ipotesi che risultasse più semplice²¹ (sebbene non vi sia niente di oggettivo in questa garanzia). Tuttavia, nessuna ipotesi di questo tipo è ancora apparsa. Nel frattempo, vi sono serie obiezioni all'ipotesi di Helmholtz, indipendentemente dalla sua semplicità o complessità.

E' soltanto necessario, a questo proposito, dimostrare (e nella letteratura vi è un enorme numero di fatti sperimentali e clinici che puntano in questa direzione) che le linee di eguale semplicità sono distribuite in un modo essenzialmente differente per la funzione della percezione uditiva e per la risonanza di un'arpa. Così, per non sovraccaricare questo studio mi limiterò a due punti.

²¹ Questa convinzione può, con molta facilità, essere falsa. La fisica contemporanea fornisce molti esempi di ciò. Le teorie di de Broglie, Einstein, Heisenberg, Schrödinger o Dirac sono molto più complicate dei concetti che hanno soppiantato. Per erigere la semplicità a criterio di affidabilità, si dovrebbe affermare, in principio, che le categorie della logica e della psicologia dominano le categorie della realtà oggettiva e le determinano e noi non abbiamo alcuna autorità per porre apriorità di questo tipo.

Stiamo facendo una comparazione tra un sistema la cui operatività funzionale ci è sconosciuta, l'apparato della percezione uditiva, ed un modello fisico noto – un gruppo di risuonatori, che per ragioni di chiarezza è stata chiamata un'arpa risuonante. Per quest'ultima struttura, la più semplice di tutte le operazioni è la determinazione della frequenza assoluta di un tono; ciò consegue dalla sua intima struttura. La determinazione del rapporto tra le frequenze delle componenti è, per questa ragione, più complicato. Tuttavia, la statistica della pedagogia musicale (J.V. Kries; O. Abraham; G. Revesz) dimostra che la padronanza di un timbro assoluto è un'occorrenza molto rara, mentre la maggioranza della popolazione possiede timbri relativi. In altri termini, per l'organo dell'udito, le determinazioni relative degli intervalli sono più facili di quelle dei toni assoluti. D'altra parte, un tono musicale puro è più semplice, nella sua struttura acustica, dei suoni della voce umana, vocali con i loro numerosi costitutivi e consonanti con la loro caratteristica fonazione.

Per un'arpa risuonante questi possono essere riconosciuti in nessun altro modo che attraverso la loro analisi, che ne determini i singoli componenti e soltanto dopo la determinazione di queste componenti; conseguentemente, in questo modello la discriminazione dei suoni della voce è più complicata della discriminazione dei toni puri e si basa interamente sull'ultimo processo.

Per quanto riguarda l'organo dell'udito, molte persone possiedono la capacità di una discriminazione (relativa) musicale, mentre tutta la popolazione percepisce e comprende i suoni della lingua. Sono stati descritti casi molto pertinenti di sordità al tono (L. Alt; W Köhler). Il paziente di Köhler non soltanto non comprendeva ciò che significava il termine melodia, ma era anche incapace di distinguere tra un tono alto ed uno basso, mentre poteva discriminare tutte le sfumature del linguaggio e dell'accento, molto accuratamente, riuscendo ad imitare gli accenti provinciali molto abilmente, nel raccontare aneddoti (queste persone non hanno difetti fisici all'udito).

Di nuovo, siamo di fronte ad un'inversione dei livelli di difficoltà, nei confronti dell'apparato risuonatore che abbiamo ipotizzato. Da entrambe le comparazioni risulta chiaro che l'organo dell'udito dà una gradazione essenzialmente differente di semplicità, da quella ipotizzata nel meccanismo risuonatore – una gradazione che ammonta, in alcuni esempi, ad una diretta trasposizione dell'ordine di difficoltà. E' questa circostanza che è criticamente dannosa all'ipotesi di Helmholtz, indipendentemente dalla sua complessità o semplicità.

La discussione nella 3 sezione, sull'esempio della mancanza di corrispondenza tra la teoria della localizzazione muscolare nella corteccia e l'idea della localizzazione dei riflessi condizionati è chiaramente un caso particolare dell'uso di un principio che è stato qui descritto ampiamente.

Ulteriori esperimenti ed osservazioni sui cambiamenti dell'accuratezza dei movimenti nelle loro differenti variazioni, e per i corrispondenti cambiamenti

nell'irradiazione di un'abitudine motoria, possono dischiudere un'ampia serie di regolarità strutturali nel campo motorio e nelle funzioni motorie del cervello, nella loro interezza – regolarità, che non possono essere anticipate al presente. Soltanto una cosa può già essere anticipata con certezza. Ogni nuova scoperta nel campo della struttura coordinativa sarà, allo stesso tempo, una nuova scoperta sulla via della struttura localistica; e quel giorno, quando capiremo l'una, saremo in grado di dire che comprendiamo anche l'altra.

Bibliografia

1. Bernštejn N A, Studi di biomeccanica per mezzo della registrazione fotografica, Ricerca dell'Istituto Centrale del lavoro, Mosca, 1, 1923
2. Bernštejn N A, Una nuova biomeccanica, Ricerca dell'Istituto Centrale del lavoro, Mosca, 1, 2, 1924
3. Bernštejn N A, Popova T S, Ricerca della biodinamica della suonata al piano, Fisiologia del lavoro, Mosca, 1929
4. Bernštejn N A, Indirizzi clinici della moderna biomeccanica, Collezione di studi dell'Istituto per il progresso medico, Kazon, 1929
5. Bernštejn N A ed altri, Studi sulla biomeccanica della locomozione (Il passo normale, il carico, l'affaticamento), Istituto di Medicina sperimentale, Mosca, 1935
6. Bethe A, Fischer, La Plasticità del Sistema nervoso, Trattato di fisiologia normale e patologica, Berlino, 1927
7. Foerster O, La fisiologia e la patologia della coordinazione, Psichiatria, 41, 11-12
8. Lewy F, La posizione eretta del corpo, Berlino, 1924
9. Monacow C, La localizzazione nel cervello, Wiesbaden, 1914

Fig. 1

Una rappresentazione semi-schematica del decorso di un singolo impulso centrale, durante un movimento ritmico.

- A La curva dei cambiamenti non ritmici nel campo delle forze esterne.
- B Il risultato ritmico integrativo (sommatorio).
- C (Area tratteggiata) L'impulso che copre la divergenza tra la curva A ed il risultato integrativo B.

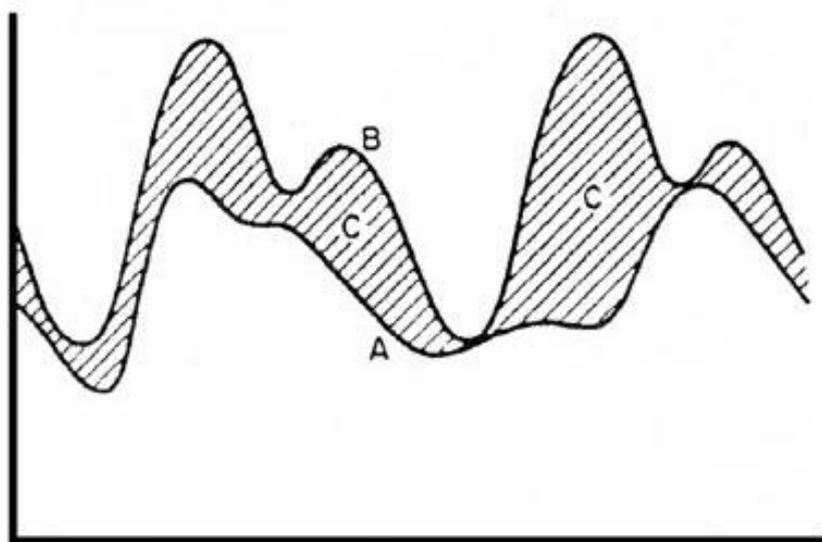


Tabella 1

Marcia	<i>Ampiezze Assolute</i>				<i>Ampiezze relative</i> ($A_1 = 100\%$)		
	A ₁ cm	A ₂ cm	A ₃ cm	A ₄ cm	A ₂ %	A ₃ %	A ₄ %
Dislocazione longitudinale del punto del piede	38,50	9,09	0,80	0,67	23,6	2,08	1,74
Dislocazione longitudinale del centro di gravità del braccio	7,60	0,81	0,15	0,07	10,65	1,98	0,92
Dislocazione longitudinale del centro di gravità della gamba	14,47	1,22	0,49	0,22	8,42	3,39	1,52

Fig. 2

Movimenti circolari, effettuati con il braccio disteso in varie posizioni, sono prodotti da schemi innervazionali completamente differenti, per traiettorie dello stesso tipo.

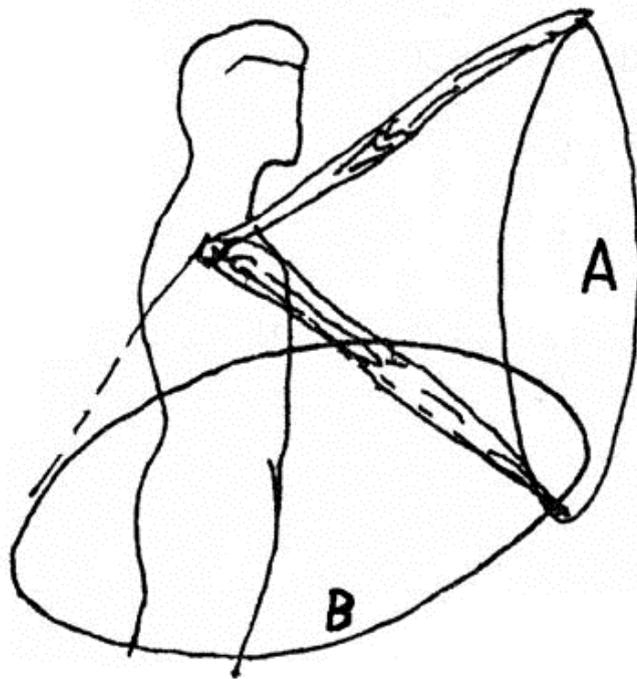


Fig. 3

Sommario dei dati forniti da O. Foester sulla stimolazione di vari punti degli emisferi corticali umani (1926).

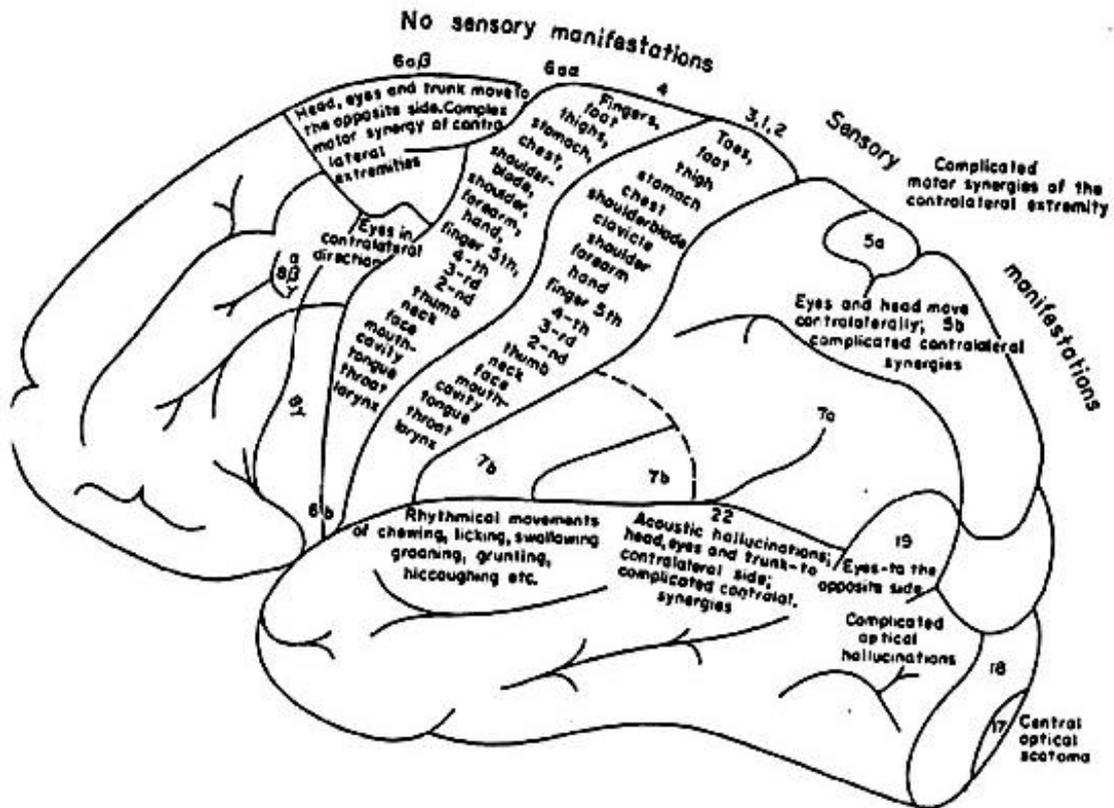


Fig. 4

La molteplicità delle vie efferenti per il controllo di 6 muscoli a, b, c, d, e, f, da parte di 5 centri effettivi A, B, C, D, E dà, anche in questo esempio intenzionalmente semplificato, uno schema innervazionale strutturalmente complesso.

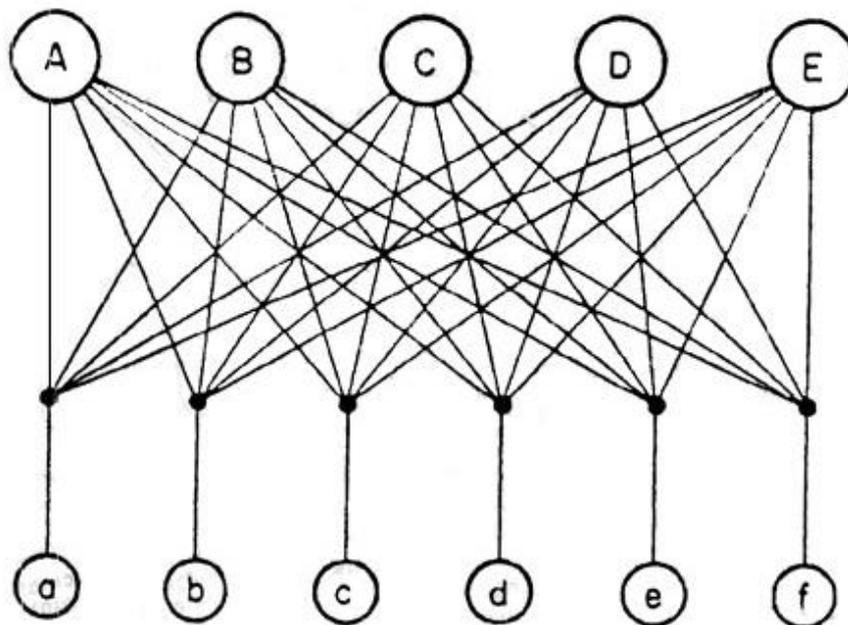


Fig. 5

Tre diagrammi per due tubi amplificatori di audio-frequenze. I diagrammi (a) e (b) sono identici in tutti i dettagli; il diagramma (c) è molto diverso, in principio di funzionamento, dagli altri sistemi.

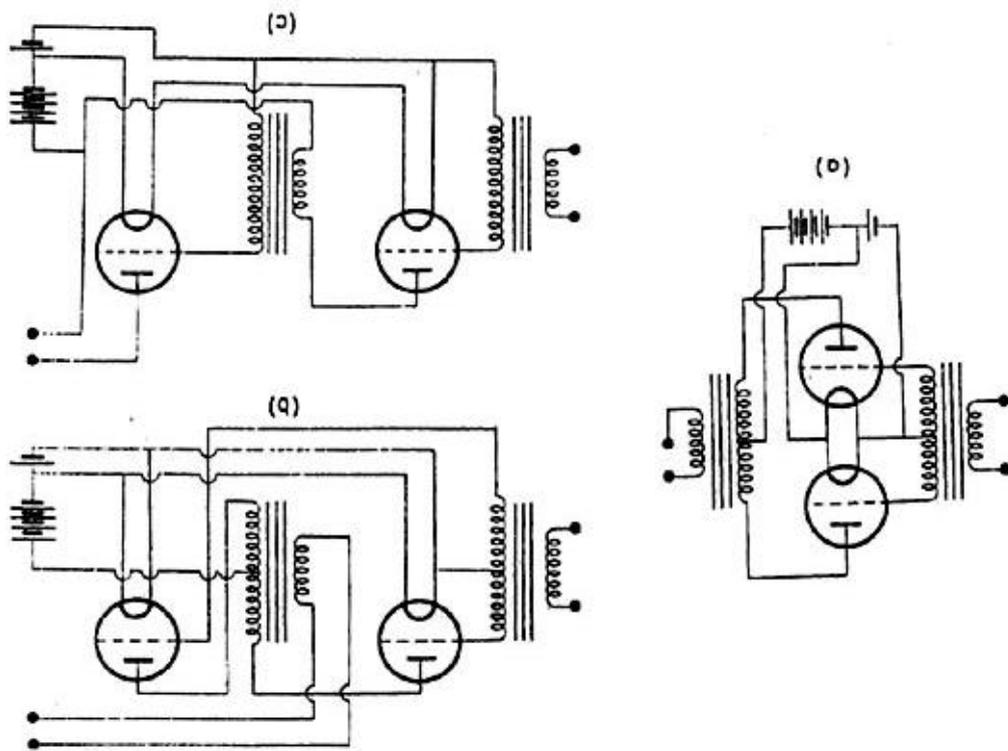


Fig. 6

Due possibili schemi teorici per successive emissioni di engrammi motori a, b, c, d, e ed f.

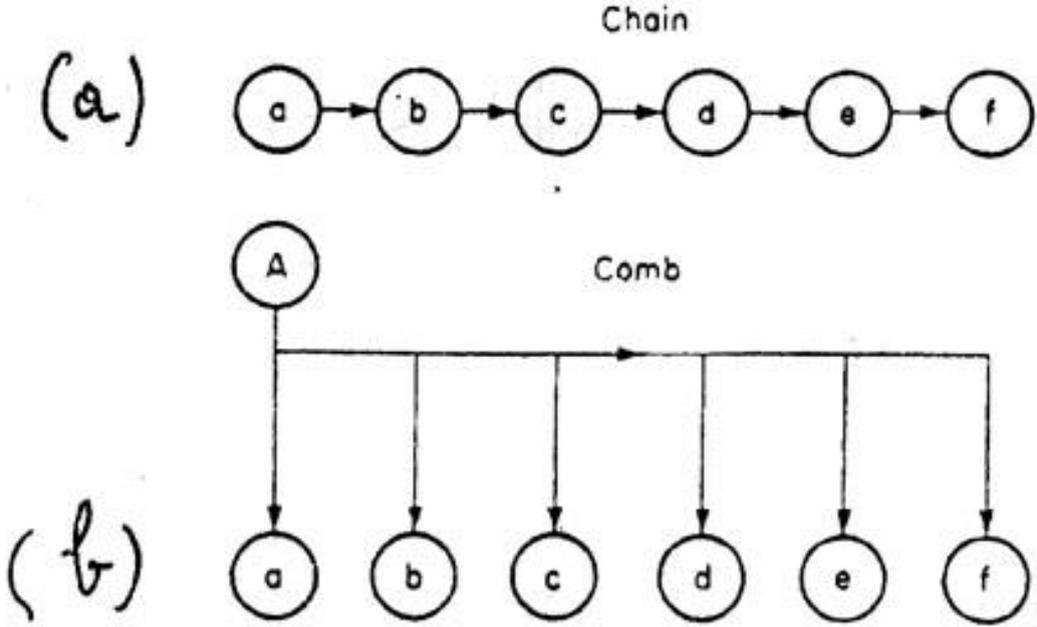


Fig. 7

Da 1 a 5, classe topologica di stelle a cinque punte; 6, classe topologica di figura ad otto, con 4 angoli; da 7 a 14, classe topologica di lettera A.

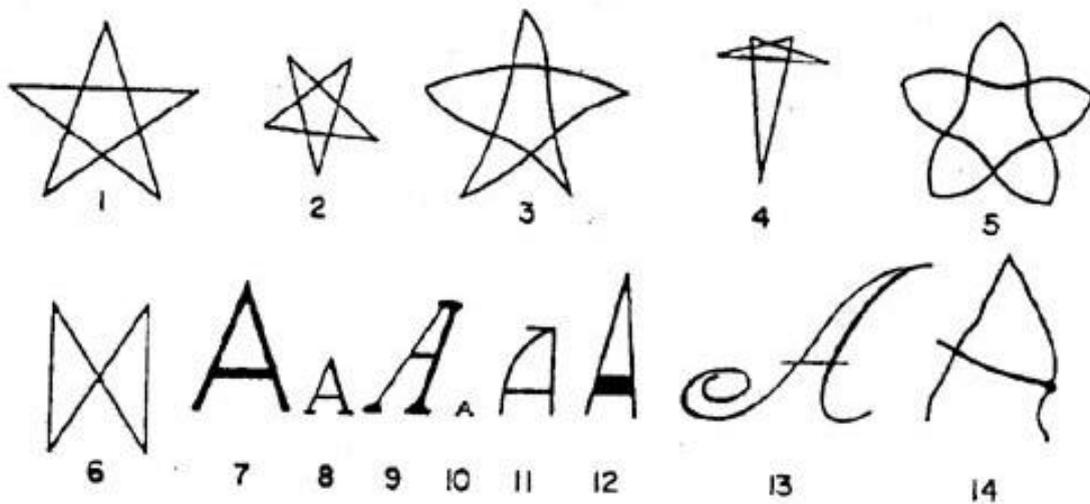


Fig. 8
Ciclogramma di una serie di movimenti poco automatizzati, ripresi sullo stesso disco.

