

L'intelligenza biologica II processing neurale

Alberto Borghese
Università degli Studi di Milano
Laboratorio di Motion Analysis and Virtual Reality
(MAVR)
Dipartimento di Scienze dell'Informazione
borghese@dsi.unimi.it



A.A. 2003-2004

1/50

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese>



Sommario



Il neurone, modelli di neurone ed i frattali.
Modelli connessioneisti di neuroni e le reti neurali.
Mappe e clustering.
Reti neurali con neuroni a base radiale.
L'apprendimento con rinforzo.

La corteccia e le funzioni cognitive.

Il Processing neurale.

Mappa di attivazione motorie

I meccanismi di reaching e grasping.

Trasformazioni visuo-motorie.

Modelli neurali e trasformazioni.

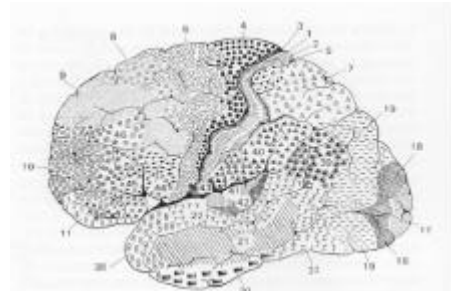
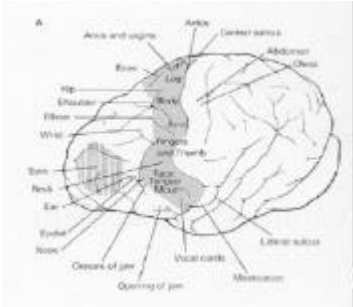
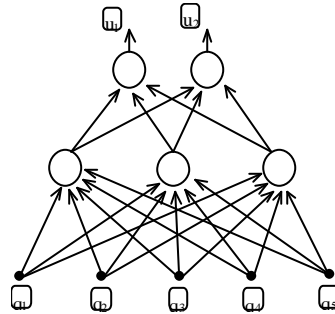
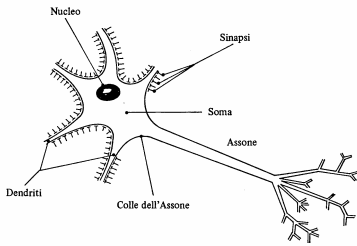
A.A. 2003-2004

2/50

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese>



Dalle reti neurali alla neuro-anatomia funzionale

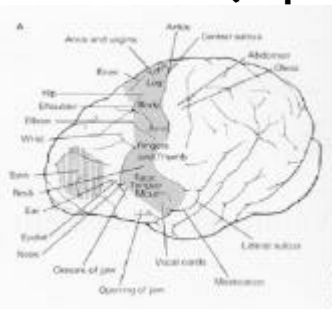


A.A. 2003-2004

3/50

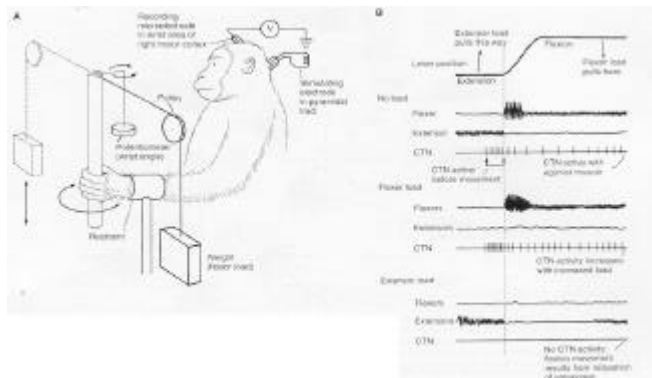


L'attività neurale nella corteccia motoria (esperimenti di E. Evarts)



Aree motorie del polso: flesso-estensione
 CTN – Cortico-spinal Tract Neurons.

Neuroni sensibili alla intensità dell'attività (forza), in una direzione (flessione) e della derivata dell'intensità dell'attività.



A.A. 2003-2004

4/50

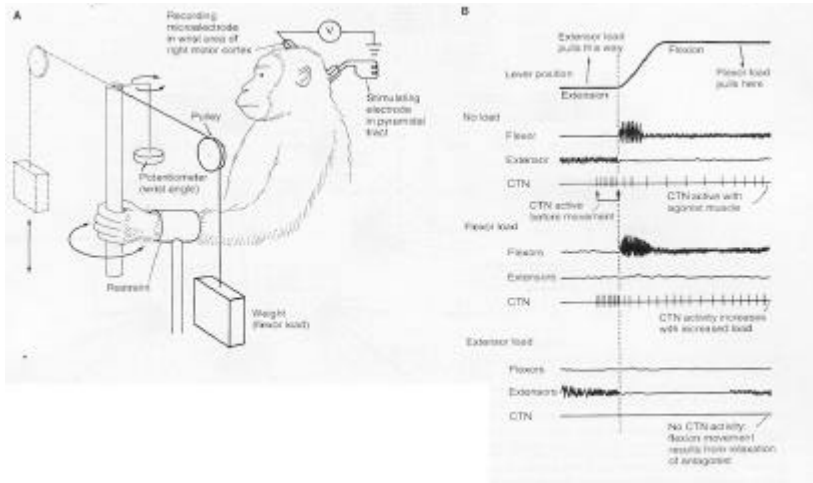
<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



Output dalle aree motorie



I neuroni corticali vengono attivati prima dell'inizio del movimento ed hanno un'attività che dipende da: estensione/flessione e forza/derivata_forza da esercitare.



Cosa succede nei movimenti multi-joint?



Negli esperimenti di Evarts, la direzione della coppia del movimento coincideva con la coppia articolare.

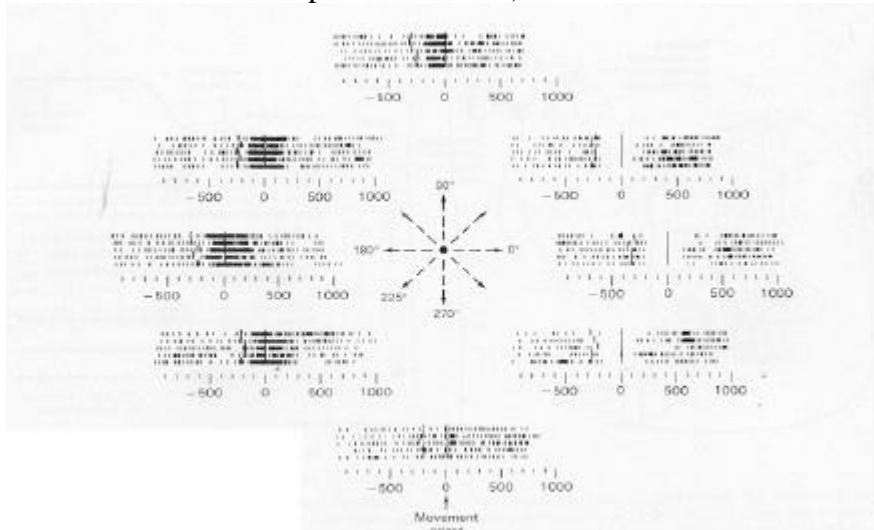
La direzione del movimento coincideva con la direzione della coppia articolare.



Codifica della direzione del movimento (esperimenti di Georgopoulos)



Cella con attività massima nel range da 90 a 225 gradi (la direzione è determinata in uno spazio estrinseco).



mi.it-borghese



Codice di popolazione



La direzione del movimento è codificato dall'insieme dei neuroni, non dal neurone singolo!

L'ampiezza, a_i , del contributo di un neurone n_i , è lungo la sua direzione preferenziale. *Tuning con forma cosinusoidale, "a campana" (cosa ricorda?)*.

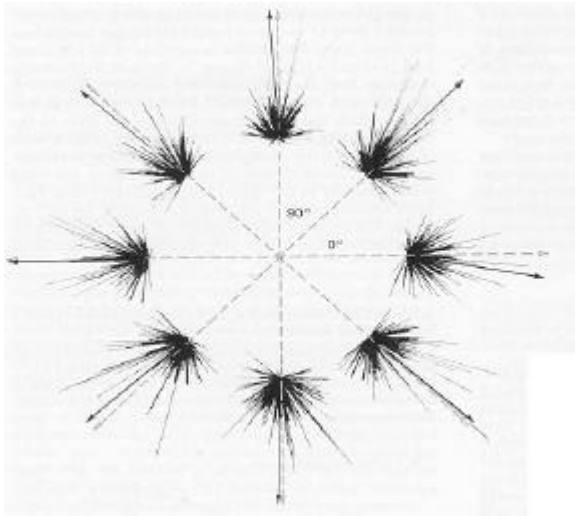
Per valutare forza e direzione del movimento viene effettuata la somma vettoriale dell'attività di tutti i neuroni, dove l'attività di ciascun neurone è considerata lungo la sua direzione preferenziale.

La direzione del movimento sarà uguale alla somma vettoriale dei singoli contributi:

$$attività = \sum_i a_i \mathbf{d}_i$$



Attivazione dei neuroni della corteccia motoria



Ampiezza dell'attivazione lungo la direzione preferita di ciascun neurone.

La direzione del movimento è codificata dall'insieme dei neuroni, non dal neurone singolo!



Osservazioni



La popolazione “ruota” con il ruotare della direzione del movimento.

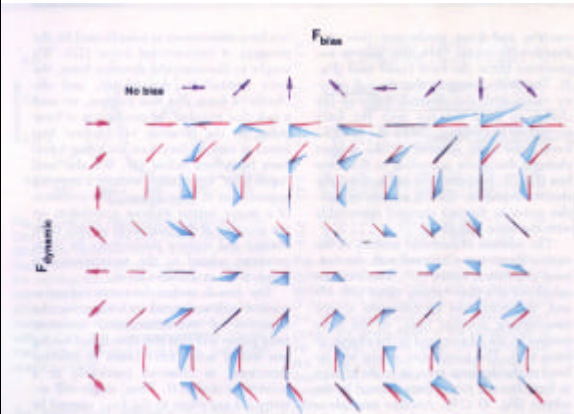
Siti multipli per gradi di libertà distali (e.g. afferrare con due dita attiva aree diverse da quelle attivate per afferrare con il palmo).

Movimenti effettuati sotto l'impulso della collera, apparentemente non passano per l'area motoria.

Muscoli della faccia (mandibola) attivi quando un animale scatta per mordere, sono diversi da quelli che l'animale utilizza quotidianamente per mangiare.



Fase di trasporto e il codice di popolazione



1. Corteccia motoria (M1), anticipa il movimento. Codifica della forza.
2. Corteccia pre-motoria dorsale (PMd).
3. Corteccia somato sensoriale (Area 2).
4. Superior parietal lobule (Area 5), segue il movimento.

Blue: Total Force (related to static condition)

Red: Delta Force (required to start motion).

Modello VITE (cf. Bullock and Grossberg, 1988).

Rappresentazione cinematica vettoriale del movimento.

11/50

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



Le aree motorie e la produzione del movimento (reaching e grasping)



Due fasi: trasporto e shaping della mano (Jeannerod, 1986).

Aspetti spaziali, ma anche aspetti cognitivi (affordances, Gibson, 1966).

Primary Motor cortex: Area 4

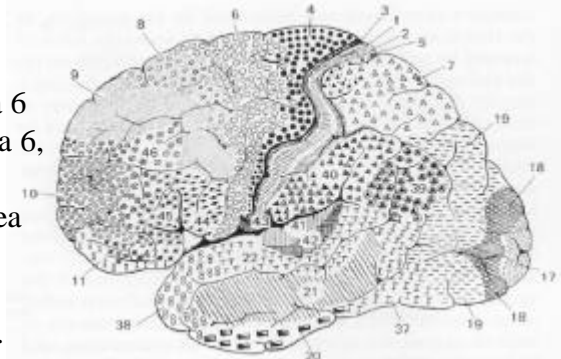
Dorsal pre-motor cortex: PMd Area 6

Ventral pre-motor cortex: PMv Area 6, 44, 45

Primary somato-sensory cortex: Area 1-3

Superior parietal lobule: Area 5-7.

Inferior parietal lobule: Area 39-40.

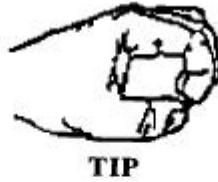




Grasping: le superfici della mano



CYLINDRICAL



TIP



HOOK or SNAP



PALMAR



SPHERICAL



LATERAL



Grasping (modalità)



Cinetica. Forze che devono essere esercitate sull'oggetto.

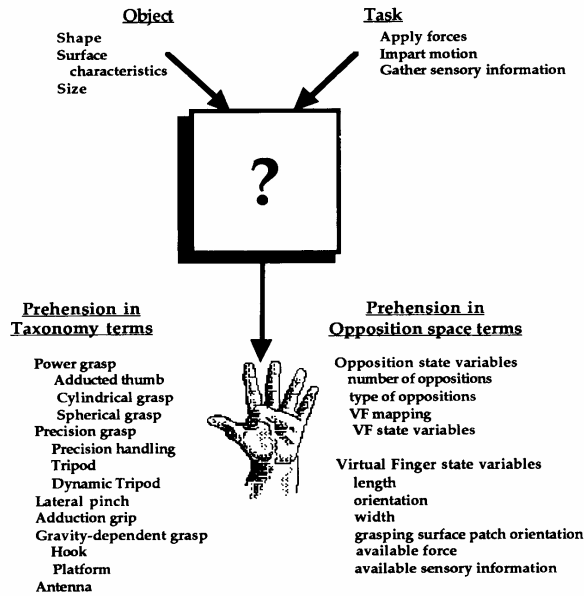
Cinematica / geometria: definizione della posa.

Input sensoriale: rugosità, temperatura, grado di lucentezza.

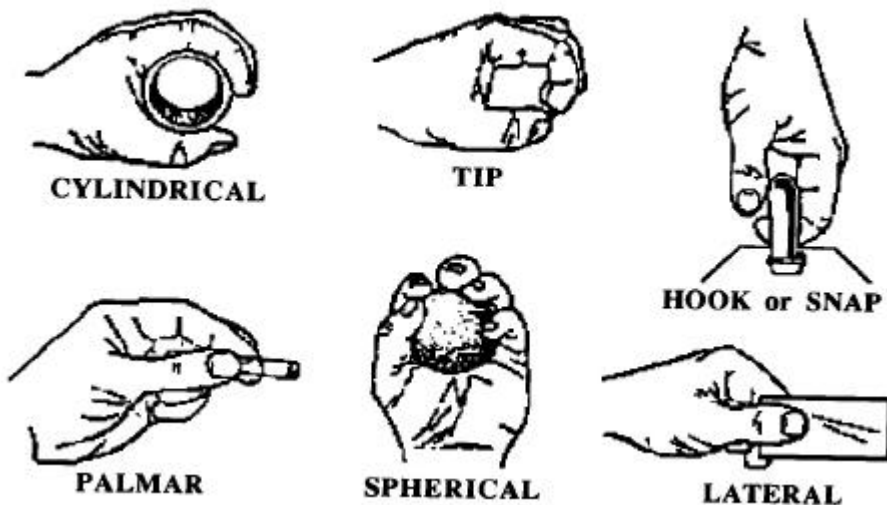
*Organizzazione dei gradi di libertà tramite libreria di primitive
(vocabolario motorio del grasping).*



Gli attori del grasping



Superfici della mano

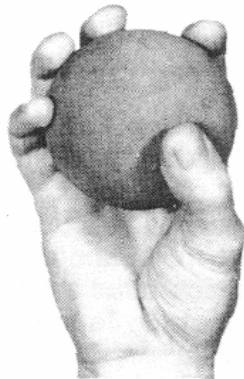




Precision vs Power grasp



A. POWER GRASP



B. PRECISION GRASP

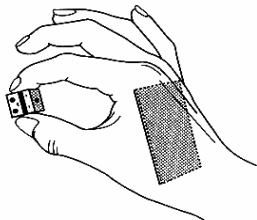


C. COAL HAMMER

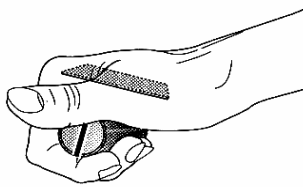
Napier 1956. Ruolo peculiare del pollice nella presa di precisione.



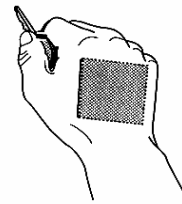
Gli spazi di opposizione



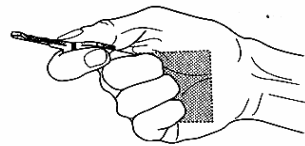
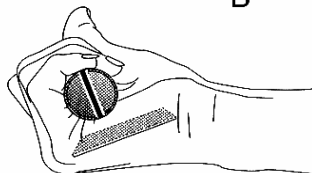
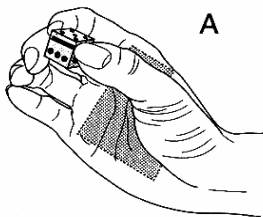
A



B



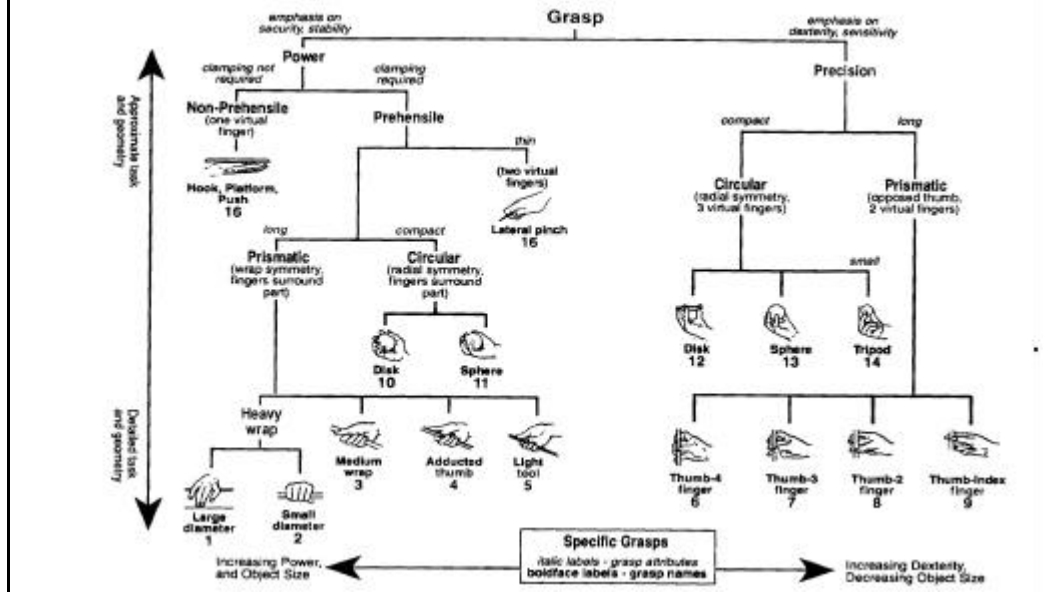
C



La ricchezza del repertorio avviene combinando i diversi tipi di presa



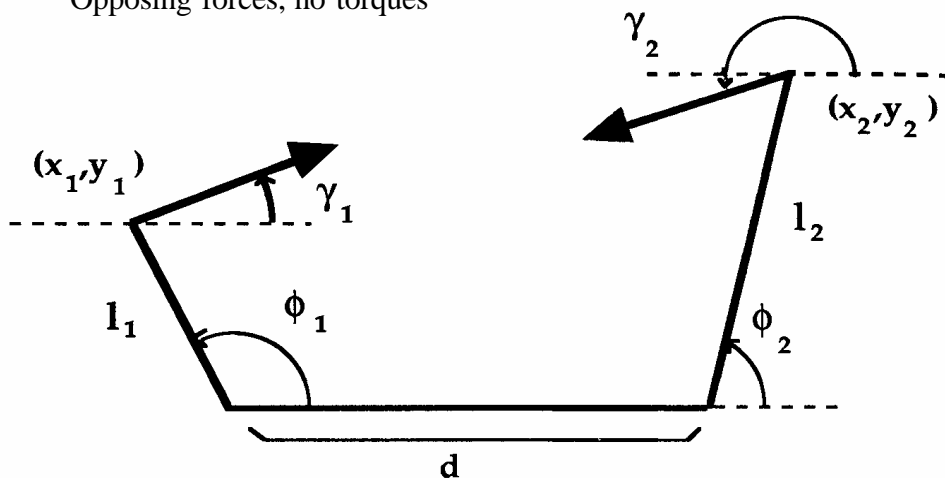
Tassonomia



Virtual fingers



Opposing forces, no torques





Il grasping



Affinità tra superficie dell'oggetto e superfici della mano.

Presa di precisione e di potenza.

Spazi di opposizione e combinazione degli spazi.

Definizione di sinergie (virtual fingers).



Circuiti del reaching e del grasping



Il reaching viene controllato tramite popolazioni neurali.

Il grasping viene controllato mediante primitive motorie (corteccia motoria e pre-motoria, vocabolario motorio).



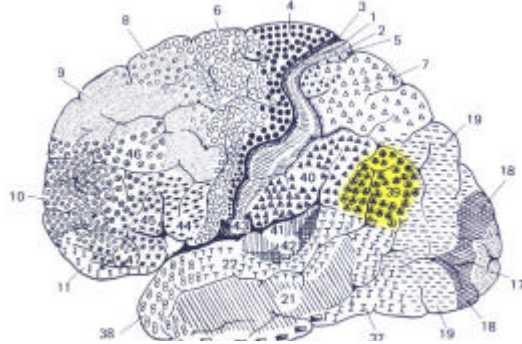
Trasformazioni visuo-motorie



- Input sensoriale
- Output motorio
- Cosa c'è in mezzo? Due possibilità. Calcolo geometrico o distribuito.

Modello neurale dell'attività nell'area 7a (parietale)
(Zipser and Andersen, 1988)

Retina -> Mondo.



A Area 7a (39) è ruolo dell'integrazione di informazione visiva e retinica. ghesse



Modellazione Neurale dell'area 7a



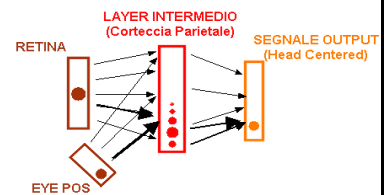
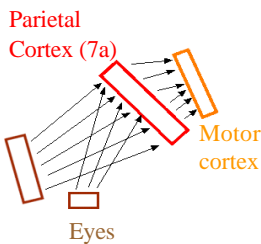
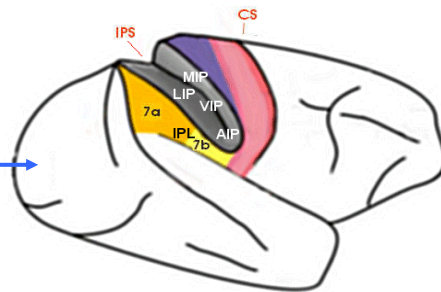
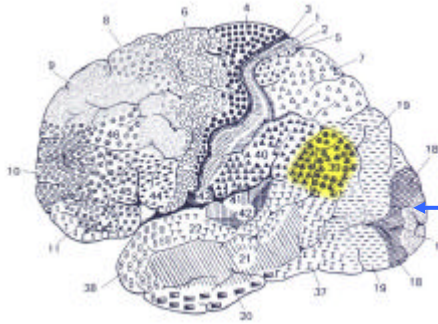
Il primo modello computazionale delle corteccia parietale è stato proposto da Richard A Andersen e David Zipser nel 1988 sulla rivista Nature.

Essi hanno costruito una rete neurale, un MLP, che trasformasse le coordinate retino-topiche in coordinate allo-centriche utilizzando il segnale della posizione dell'occhio.

Al momento del loro esperimento si conosceva che la posizione dell'occhio modulasse la risposta dei neuroni parietali nella scimmia ma non ne si capiva il significato.



Il modello connessionista di Zipser & Andersen



25/50



I tipi di neuroni dell'Area 7a



Neuroni sensibili alla posizione dell'immagine sulla retina (21%): receptive fields Gaussiani.

Neuroni sensibili alla posizione degli occhi (15%). L'attività cresce linearmente verso dx(sx) e verso l'alto(basso) con la posizione nell'orbita.

Neuroni sensibili sia alla posizione della pupilla nell'orbita che alla posizione dell'oggetto nel campo recettivo (57%). *Rappresentazione dell'attività come guadagno sull'attività determinata dal campo recettivo.*

NB Con la semplice elettrofisiologia non si può conoscere cosa sia l'input e l'output !!



Cosa ci può dire il modello neurale?



Obiettivo è codificare la posizione dell'oggetto indipendentemente dalla sua posizione sulla retina o della pupilla rispetto all'orbita.

Unità di input.

Unità di output.

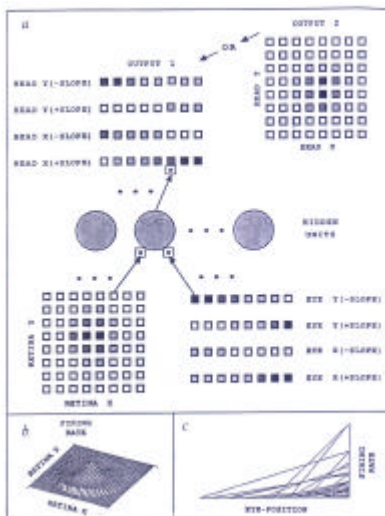
Livello nascosto di neuroni.

Training da neuroni (il processo di training stesso, consente di scoprire l'algoritmo utilizzato).

Quale funzione rappresenta la risposta dei neuroni hidden?

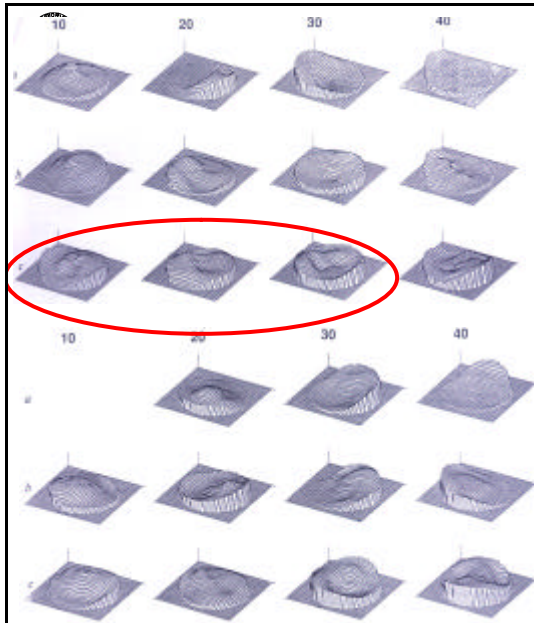


Costruzione del Modello Neurale



- *b* - Retinal neurons
- *c* - Eye position neurons
- *a* - Hidden + Output layers
- *w* - synaptic weights, Hidden layer.
- Hidden units are sigmoidal
- Training through back-propagation (iterative minimization of a cost function).
- Cost function: (object position in allocentric space - object position predicted by the network).

$$h_i = \sum_{j=1}^N \frac{1}{1 - e^{-\sum_{j=1}^N w_{ij}x_j + J_i}}$$



Risultato



(A) – real data.

Single peak cells

Single peak, complex behavior.

Double peak, complex behavior.

(B) – neural network data.

Approssimazione buona di tutti

i tipi di neuroni di tipo

semplice, con un picco;

approssimazione di un tipo su

quattro tra i neuroni con doppio

picco.

Perchè i risultati sono sorprendenti?

Rappresentazione dell'attività come guadagno sull'attività determinata dal campo recettivo.



Perchè i risultati sono sorprendenti?



Per costruire rete neurale che avesse queste proprietà loro sono partiti da una rete neurale generica alla quale hanno insegnato la trasformazione voluta con delle associazioni stimolo-risposta.

Dopo il training chiaramente la rete mostrava il comportamento desiderato. Niente di sorprendente.

La vera sorpresa è stata:

1- che i neuroni artificiali avevano formato delle connessioni simili a quelle che si trovano nella corteccia parietale.

2- i neuroni artificiali venivano modulati dal segnale di posizione oculare nello stesso modo dei neuroni reali.

Occorre rimarcare che questi profili o funzioni sono ottenuti dalle proprietà computazionali della popolazione di neuroni.



Perchè è stato un lavoro pionieristico?



Questa scoperta ha avuto 3 conseguenze importanti:

1 – Probabilmente uno dei ruoli della corteccia parietale è la trasformazione spaziale (quella che noi eseguiamo con una matrice!).

2- L'algoritmo da loro utilizzato durante il training (back-propagation) che trova le connessioni ottimali ha prodotto gli stessi risultati di madre natura.

3 – E' possibile che i neuroni parietali apprendano le loro funzioni.



Un modello più completo dell'area 7a



Il modello di Zipser e Andersen aveva lasciato alcune questioni aperte. In particolare il comportamento della rete neurale mimava solo il 30% dei neuroni parietali registrati.

Perché il restante 70% aveva campi di risposta diversi? Perché gli altri neuroni sono dediti a funzioni diverse oppure perché compiono integrazioni/trasformazioni più complesse?

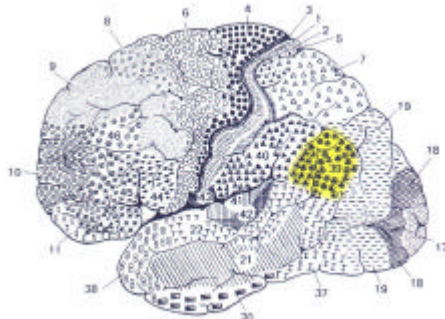
Dopo circa una decade Andersen è tornato sul problema ed ha esplorato diverse architetture



Trasformazioni multi-input / multi-output



Rappresentazione di uno stimolo in sistemi di riferimento multipli, ciascuno adatto ad un particolare task.

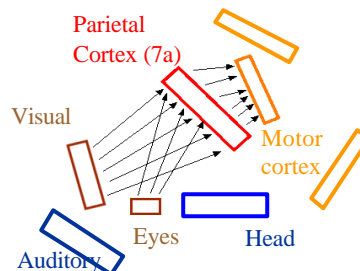
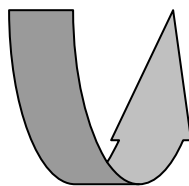
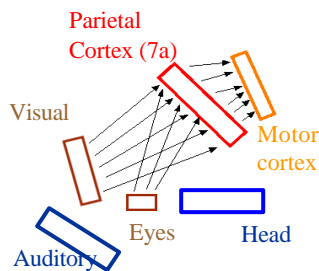
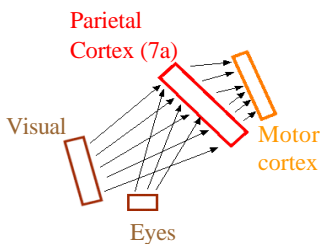


E.g. Rappresentazione in un sistema di riferimento solidale con gli occhi, si può ottenere “sottraendo” la posizione degli occhi nelle orbite alla posizione dello stimolo (uditivo o visivo) in un sistema di riferimento cranio-topico.

Risposta dei neuroni PPC ad uno stimolo sensoriale è modulata dalla posizione degli occhi e della testa.



Mappe Input / Output più ricche





Tipi di modelli considerati

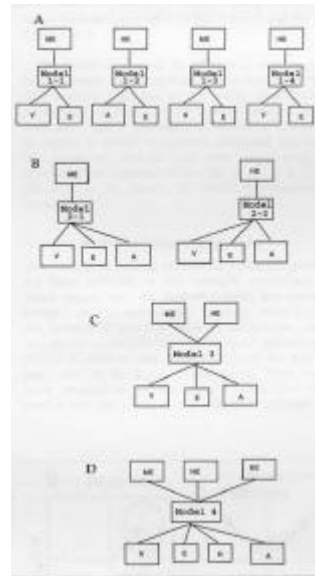


Neuroni che ricevono input visivi e forniscono un unico tipo di output (A), già esaminati.

Neuroni che ricevono input visivi o uditivi (+ posizione degli occhi) e forniscono un unico tipo di output (B).

Neuroni che ricevono input visivi o uditivi (+ posizione degli occhi) e forniscono due tipi di output (C).

Neuroni che ricevono input visivi o uditivi (+ posizione occhi e testa) e forniscono tre tipi di output (D).



Struttura delle reti neurali.

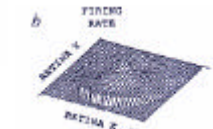
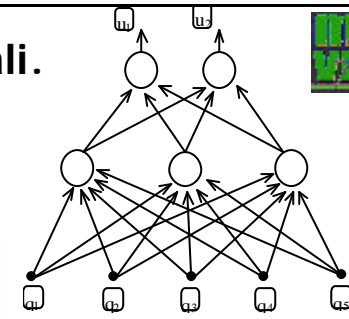
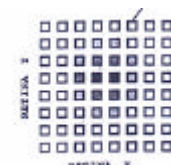


Multi-layer perceptron: 3 livelli: input + 2 livelli di unità sigmoidali.

Input

Input sensoriale organizzato in mappe di attivazione. Per la visione le mappe sono nel sistema di riferimento degli occhi, per l'udito nel sistema di riferimento cranio-centrico.

La posizione degli occhi e della testa è codificata da unità monotone.





Hidden and Output layers

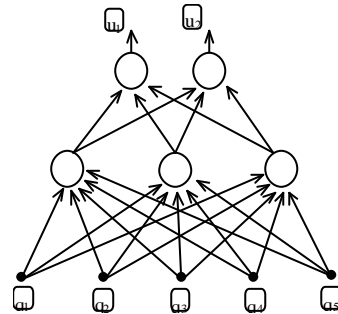


Hidden layer

20 Sigmoidal units.
Rete completamente connessa.

Output layer

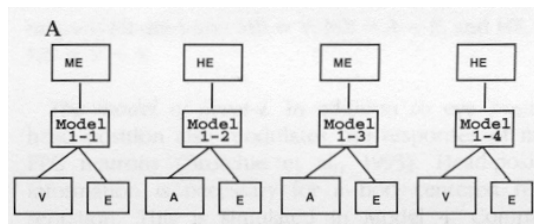
Mappa in coordinate oculo-centriche.
Mappa in coordinate cranio-centriche.
Mappa in coordinate ego-centriche.



Le mappe hanno dimensioni 8 x 8 e codificano l'”errore” motorio, ovvero la direzione del movimento nel sistema di riferimento relativo.



Funzionamento dei modelli (A)



I modelli 1-2. Rimappano l'input dalla mappa sensoriale (modulazione della mappa sensoriale).

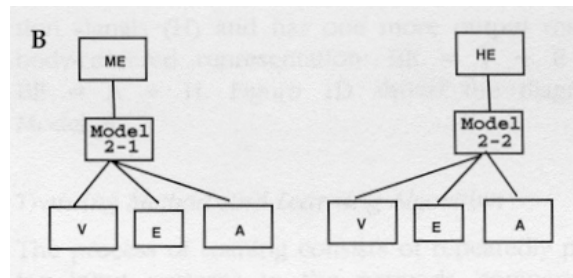
I modelli 3-4, richiedono una trasformazione di coordinate (3 – da mappa head centered in mappa eye centered; 4 da mappa eye centered a mappa head centered).

ME – Motor error in Eye coordinates.

HE – Head posizione error in Head coordinates.



Funzionamento dei modelli (B)



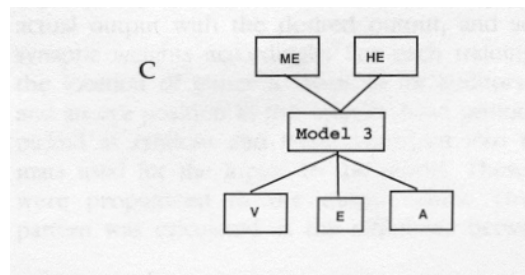
I neuroni Hidden sono bimodali. Operano per uno dei due stimoli un rimapping e per l'altro una trasformazione di coordinate.

ME – Motor error in Eye coordinates.

HE – Head position error in Head coordinates.



Funzionamento dei modelli (C)



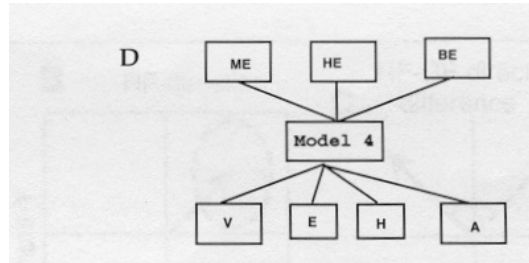
Raggruppa in un unico circuito i neuroni di tipo A e B.

ME – Motor error in Eye coordinates.

HE – Head position error in Head coordinates.



Funzionamento dei modelli (D)



Per potere operare con successo nell'ambiente occorre conoscere anche la posizione della testa rispetto al corpo.

ME – Motor error in Eye coordinates.

HE – Head position error in Head coordinates.

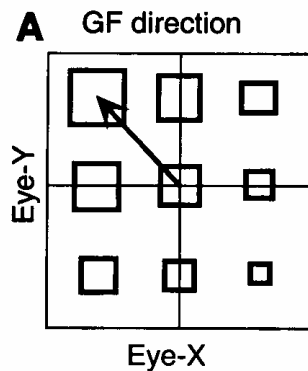
BE – Body position error in Body coordinates.



Analisi delle Hidden units (GF)



GAIN FIELDS (GF). L'ampiezza della risposta ad uno stimolo viene modulata dalla posizione degli occhi.



La dimensione del quadrato è proporzionale alla posizione degli occhi rispetto alla posizione dello stimolo.

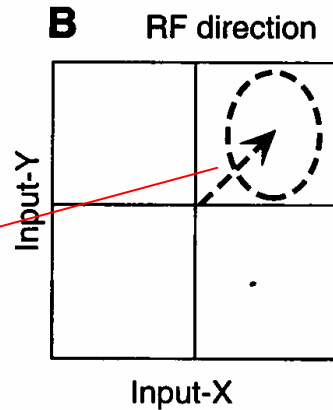


Analisi delle Hidden units (RF)



RECEPTIVE FIELDS (RF). L'ampiezza della risposta di una hidden unit ad uno stimolo all'interno del campo recettivo è significativa.

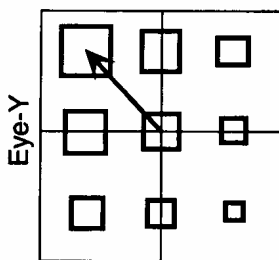
Direzione del campo recettivo.



Analisi delle Hidden units (GF - RF)

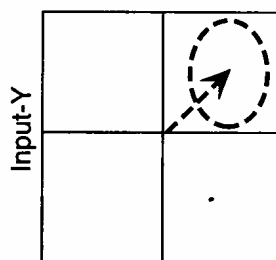


A GF direction



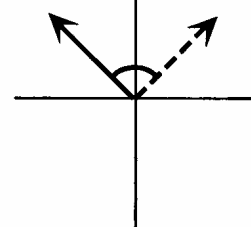
Eye-X

B RF direction



Input-X

C RF-GF direction difference



Misura la differenza tra la direzione del campo recettivo (RF) e la direzione del Gain Field (GF) per lo stesso stimolo sensoriale.



Riepilogo del modello



Queste nuove esplorazioni di Andersen hanno aiutato a chiarire una domanda fondamentale che era rimasta aperta.

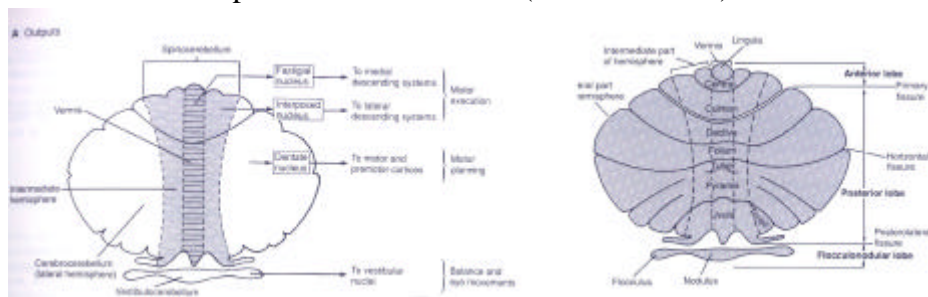
- 1- In alcune architetture i Gain Fields sono necessari per le trasformazioni spaziali.
- 2- Le risposte più simili ai dati elettro-fisiologici sono quelle dei modelli che supportano diversi sistemi di coordinate.
- 3- E' possibile che la corteccia parietale sia la sede di rappresentazioni spaziali intermedie che vengono utilizzate da strutture successive.



Un esempio di controllo tramite modelli interni: cervelletto



Dimensione temporale del movimento (modelli interni)



Albus (1975) Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC). Trans. of ASME J. Of Dynamic Systems, Measurement and Control. Associative memory for control.

Multi-variable, nonlinear dynamical system.

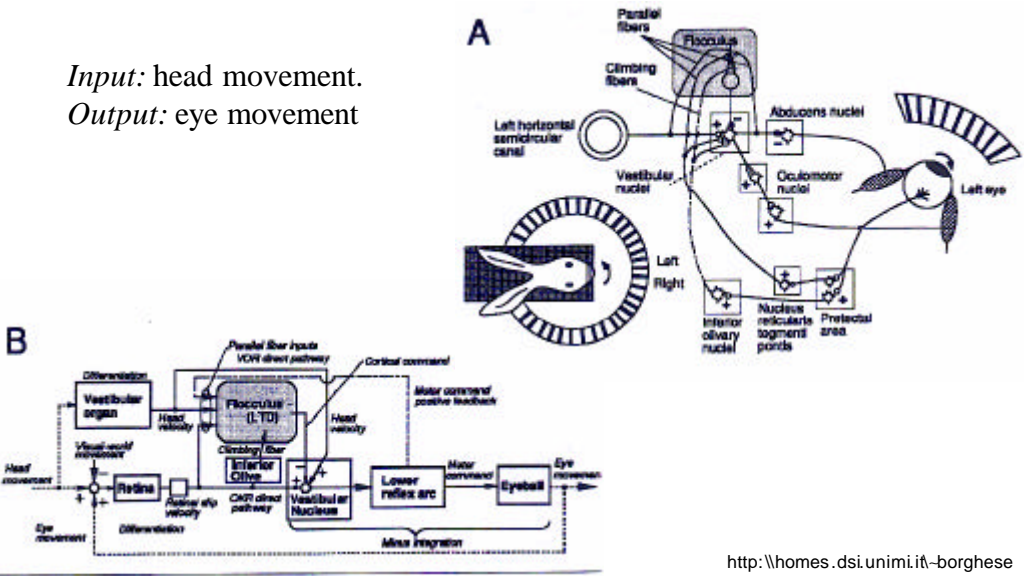
- *Direct model*: Input: force (firing rate) → output: kinematics
- *Inverse model*: Kinematics → Input force (firing rate).



Modello di controllo del VOR (Riflesso Vestibulo-Oculare - Shidara & Kawato, 1992)



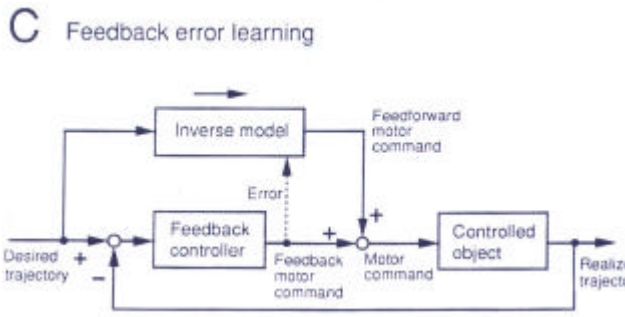
Input: head movement.
Output: eye movement



<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



Feedback error learning



- Eye-ball → Controlled object
- Eye movement → Realised trajectory
- Head movement → Desired trajectory
- Retina → Feedback controller
- Retinal slip velocity → Feedback motor command
- Flocculus → Inverse model
- Climbing fibers → Error

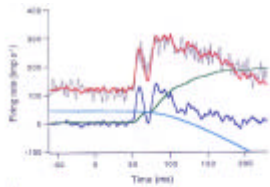


Modello della funzionalità del flocculus nel VOR (Shidara et al., 1994)

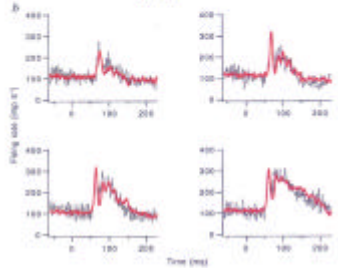


Inverse dynamical model - $f(t - \Delta t) = a p''(t) + b p'(t) + c p(t) + d$.

Stimoli a velocità diverse



Azzurro: posizione
Verde: velocità
Blu: accelerazione
Rosso: attività della Purkinji



Non tutte le cellule registrate soddisfano il modello di cui sopra, c'è molto di più. Questa è parte della storia, la ricerca continua.

Quale rappresentazione per i movimenti multi-jointed (cf. I. Wickelgren, Science, 1998; Topka & Dichgans, 1997; Bastian et al., 1996)?

Interazione dinamica
Timing



Riepilogo



Calcolo delle trasformazioni mediante campi recettivi ed attivazione lineare.

Apprendimento e rappresentazione della dinamica.

Pianificazione e generazione del controllo tramite modelli.