

# Il processing neurale

Alberto Borghese  
Università degli Studi di Milano  
Laboratory of Applied Intelligent Systems (AIS-Lab)  
Dipartimento di Scienze dell'Informazione  
[borgnese@dsi.unimi.it](mailto:borgnese@dsi.unimi.it)



A.A. 2004-2005

1/32

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



## Sommario



Codice di popolazione nell'area motoria.

Trasformazione di sistemi di riferimento nell'area parietale

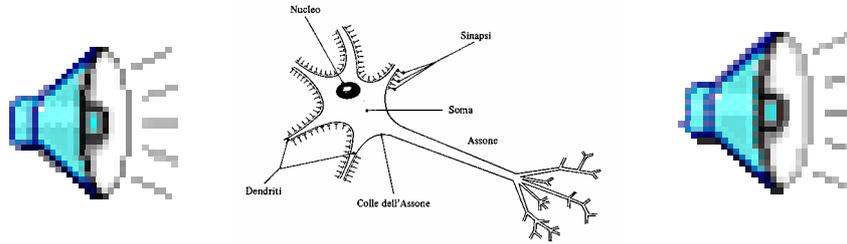
A.A. 2004-2005

2/32

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



# Il suono del neurone



Codice di frequenza. Frequenza funzione di che cosa?

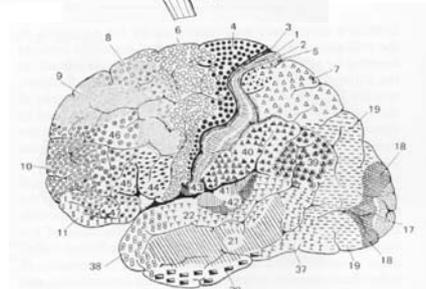
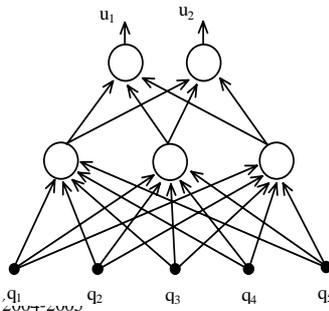
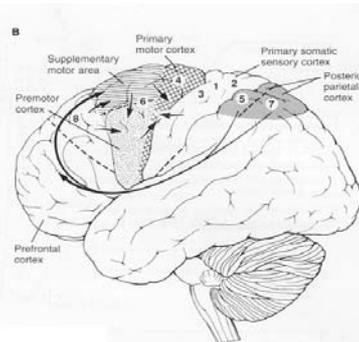
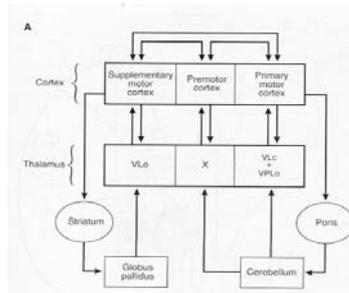
A.A. 2004-2005

3/32

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



# Dalle reti neurali alla neuro-anatomia funzionale



A.A. 2004-2005

4/32

iese



## Indagine Sperimentale



Registrazione da cellule corticali durante un task motorio. Sono studiate cellule corticali che proiettano sul tratto Cortico-Spinale.

Studio della correlazione tra frequenza di scarico ed i parametri che caratterizzano il task motorio.

Identificazione della “funzione”, della “trasformazione” operata dalle cellule corticali.

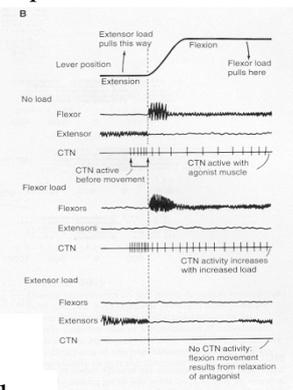
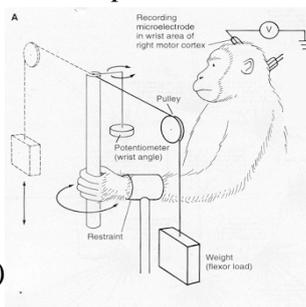
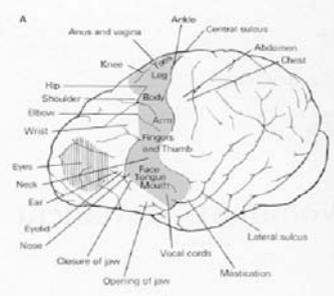


## L'attività neurale nella corteccia motoria (esperimenti di E. Evarts)



Area motoria (4) del polso: flessione-estensione

Output: CTN – Cortico-spinal Tract Neurons.



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

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



## Funzione implementata



In funzione della forza o direzione del movimento del polso, genera l'attività neurale che produce l'attività muscolare di flessione-estensione adeguata.

Neuroni specializzati in flessione ed estensione.

Frequenza – Intensità

La trasformazione è relativamente semplice. Ma....

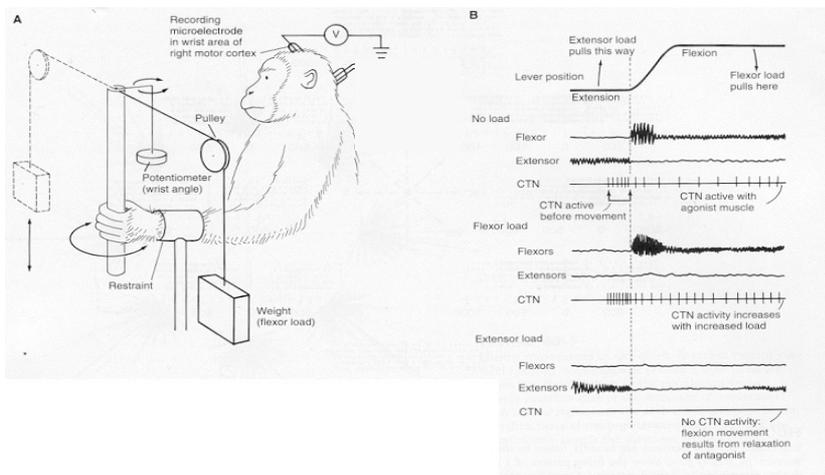


## Qual'e' l'output dalle aree motorie



Come distinguere direzione e forza?

Cosa succede nei movimenti multi-link (il polso è l'end-point della catena articolare del braccio)?





## Indagine Sperimentale (Georgopoulos et al.)



Registrazione da cellule corticali durante un task motorio di trasporto del braccio che comporti flessione ed estensione dei due segmenti del braccio.

Studio della correlazione tra frequenza di scarico ed i parametri che caratterizzano il task motorio.

Identificazione della “funzione”, della “trasformazione” operata dalle cellule corticali (area 4, motoria).



## Studio dell'attività nella corteccia motoria



9 pulsanti e luci disposte su una griglia orizzontale.

Accensione di una luce centrale e spostamento verso una delle altre luci per ottenere la ricompensa.

Registrazione dell'attività elettrica di neuroni singoli (frequenza di scarica).

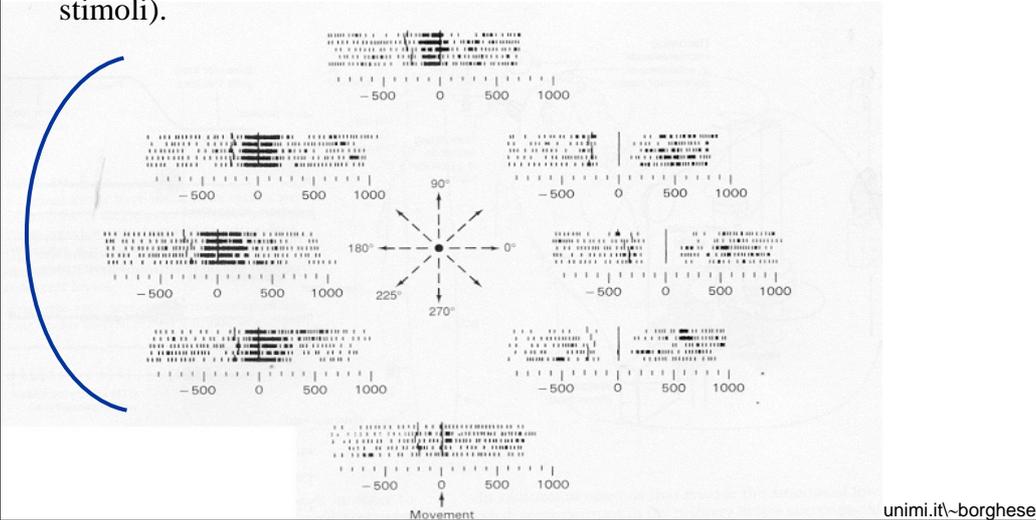
Direzione del movimento (spostamento del polso) e flessione / estensione (di braccio ed avambraccio) sono disaccoppiate.



## Direzione preferenziale (esperimenti di Georgopoulos)



Cellula con attività massima nel range da 90 a 225 gradi (la direzione è determinata in uno spazio estrinseco, quello del piano contenente gli stimoli).



## Modellazione della frequenza di scarica

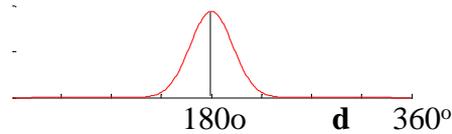


L'attività, frequenza di scarica,  $f$ , di un neurone è massima lungo la sua direzione preferenziale.

*Tuning con forma cosinusoidale, "a campana" (cosa ricorda?).*

$f(d)$   
frequenza  
di scarica

$d$  può essere misurata mediante angolo sul piano formato dal vettore spostamento rispetto all'orizzontale.





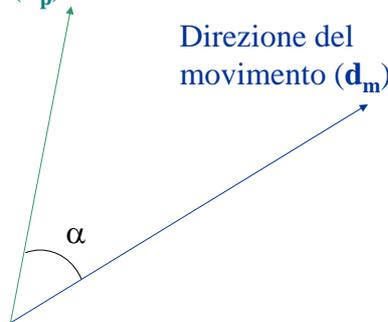
## Attività del singolo neurone



Direzione preferita del neurone ( $\mathbf{d}_p$ )

Direzione del movimento ( $\mathbf{d}_m$ )

$$f = \mathbf{d}_p \cdot \mathbf{d}_m$$



L'attività,  $f$ , di un neurone è massima lungo la sua direzione preferenziale.

*Tuning con forma cosinusoidale, "a campana" (cosa ricorda?).*

L'attività del neurone decresce con l'allontanarsi della direzione del movimento dalla sua direzione "preferita".

A.A. 2004-2005

13/32

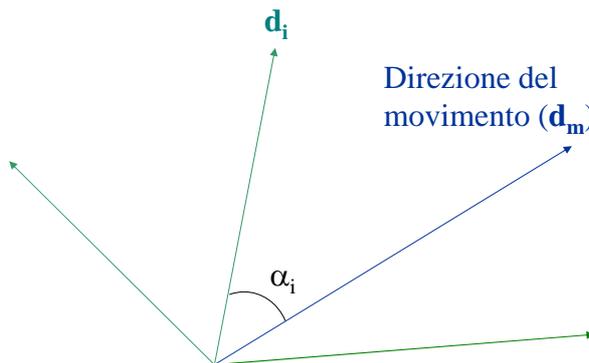
<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Attività di una popolazione di neuroni



Misura di "efficacia" dell'attivazione in relazione alla direzione di movimento  $\mathbf{d}_m$ :  $E_m = \sum_i \mathbf{d}_i \cdot \mathbf{d}_m$



Come può un sistema capire in quale direzione deve muoversi a partire dall'attività della popolazione?

A.A. 2004-2005

14/32

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



## Somma pesata dell'attività



$d_i$  rappresenta l'attività del neurone  $i$ -esimo per il movimento nella sua direzione preferenziale.

Questa attività sarà massima quando la direzione del movimento,  $d_m$ , è allineata alla direzione preferita del neurone, per decrescere allo spostamento radiale.

Quindi?

Otengo la direzione di movimento come somma pesata dei vettori di direzione preferenziale.  $d_m = \sum_i d_i \cos \alpha_i$

L'uscita della popolazione è multipla, ciascuna sintonizzata su una  $d_m$  diversa.

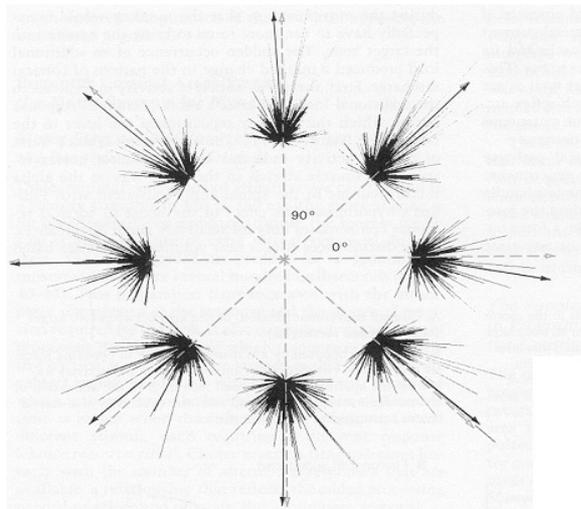
A.A. 2004-2005

15/32

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



## 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!

A.A. 2004-2005

16/32

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



## Osservazioni



Il codice di popolazione è robusto rispetto a guasti del singolo neurone.

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.



## Sommario



Codice di popolazione nell’area motoria.

Trasformazione di sistemi di riferimento nell’area parietale



## Trasformazioni visuo-motorie.



La corteccia motoria genera attività che muove l'arto in una certa direzione.

Questo movimento è codificato rispetto alla posizione del corpo.

L'informazione sulla direzione del movimento viene rilevata dalla visione:

Immagine -> Posizione in eye reference frame

Posizione in eye reference frame -> Posizione in head reference frame  
(devo eliminare la posizione attuale degli occhi).

Posizione in head reference frame -> Posizione in body reference frame  
(devo eliminare la posizione attuale degli occhi).



## Implementazione delle trasformazioni visuo-motorie.



Immagine -> Posizione in eye reference frame

Posizione in eye reference frame -> Posizione in head reference frame  
(devo eliminare la posizione attuale degli occhi).

Posizione in head reference frame -> Posizione in body reference frame  
(devo eliminare la posizione attuale degli occhi).

Posso calcolare le trasformazioni per via analitica. Ma:

- Viene richiesto un modello a catena cinematica del braccio.
- E' un modello approssimato (cosa si intende per lunghezza di un segmento, per posizione delle cerniere...?).

Allora?



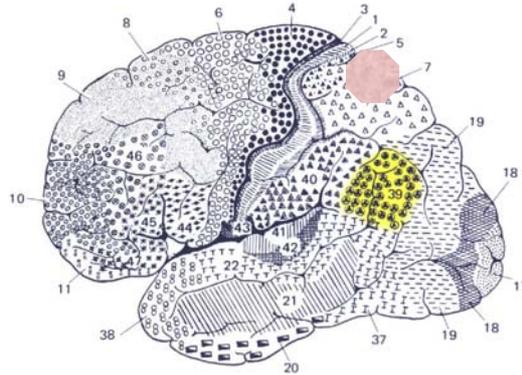
## Trasformazioni visuo-motorie



- Input sensoriale
  - Output motorio
  - Cosa c'è in mezzo? Due possibilità. Calcolo geometrico o **black box**.
- Modello neurale dell'attività nell'area 7a (parietale)  
(Zipser and Andersen, 1988)

Retina -> Spazio 3D.

Area 7a è ruolo dell'integrazione di informazione visiva e retinica.



A.A. 2004-2005

21/32

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



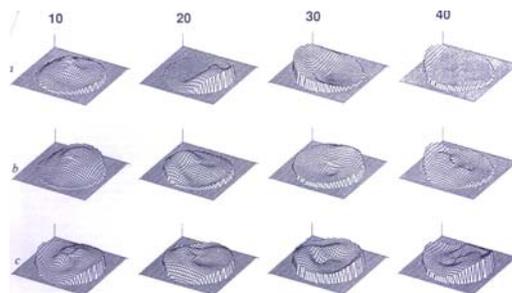
## Risposta dei neuroni dell'area 7a



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

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

Risposta in funzione della posizione dello stimolo sulla retina per 4 diverse eccentricità della posizione degli occhi (10-40 gradi).



A.A. 2004-2005

22/32



## 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 della pupilla nell'orbita.



Neuroni sensibili sia alla posizione della pupilla nell'orbita che alla posizione dell'oggetto nel campo recettivo (57%).

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



## Modellazione Neurale dell'area 7a



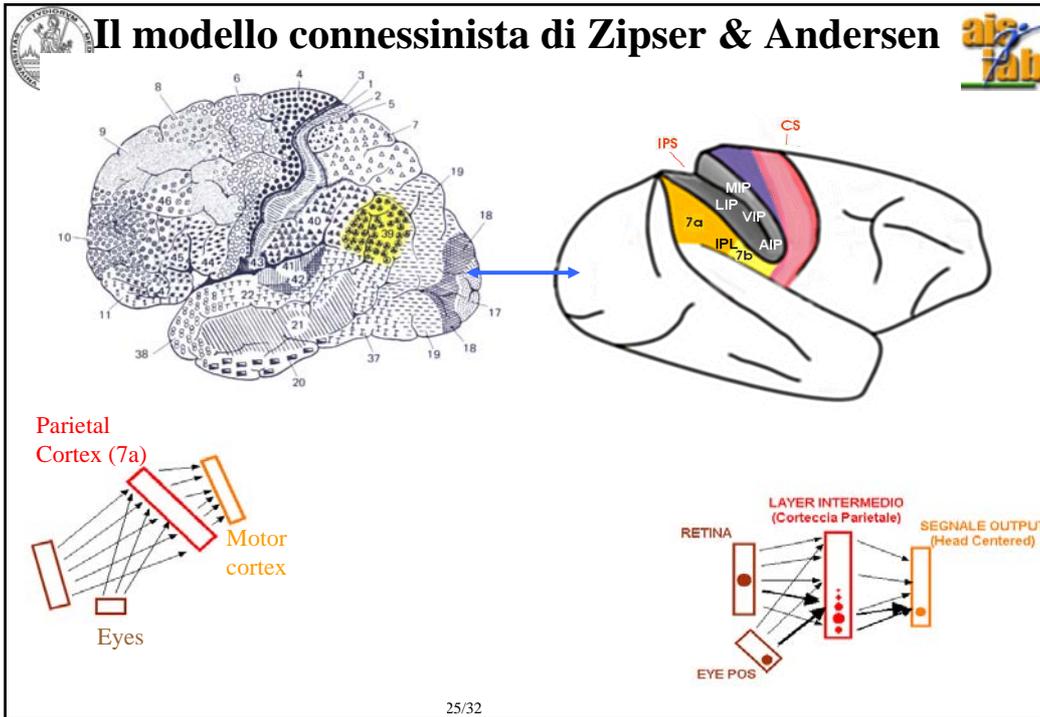
Il primo modello computazionale delle corteccia parietale è stato proposto da Richard A Andersen e David Zipser nel 1988 sulla rivista Nature.

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

Input layers: mappa retinica e posizione degli occhi.

Hidden layer: layer di trasformazione.

Output layer: direzione del movimento in sistema di riferimento della testa.



## Cosa ci può dire il modello neurale?

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

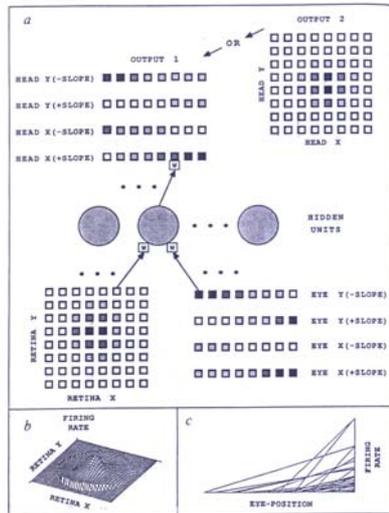
- Unità di input.
- Unità di output.
- Livello (o livelli) nascosto di neuroni.

Quale funzione rappresenta la risposta dei neuroni hidden?

A.A. 2004-2005 26/32 http://homes.dsi.unimi.it/~borghese



## Costruzione del Modello Neurale (MLP)



- *b* - Retinal neurons
- *c* - Eye position neurons
- *a* - Hidden + Output layers. Forma complessa di attivazione.

- Hidden units are sigmoidal.

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

- $w, \theta$  - synaptic weights, Hidden layer.

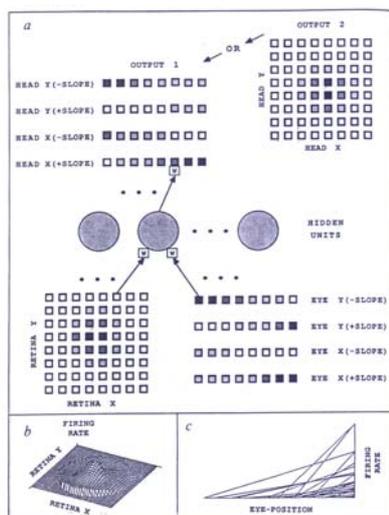
A.A. 2004-2005

27/32

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



## Apprendimento nella rete (determinazione del valore dei parametri delle unità hidden)



- Training through back-propagation (iterative minimization of a cost function).

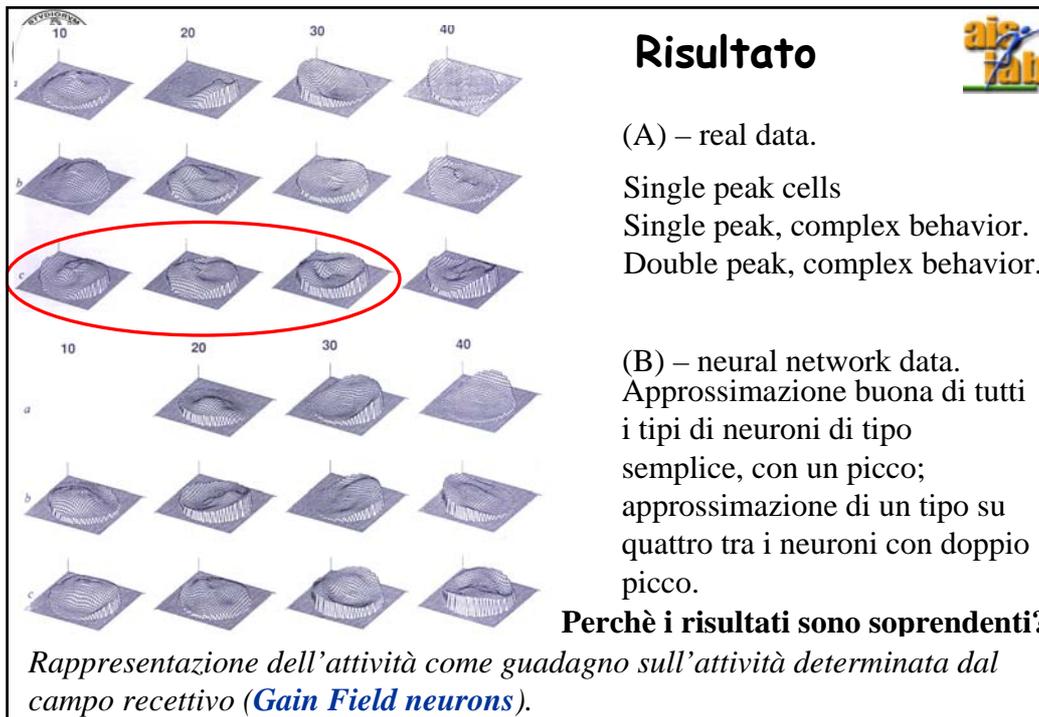
- Cost function: (object position in allocentric space - object position predicted by the network).

- La rete apprende. E' in grado di generare l'uscita corretta in funzione dei pattern di input.

A.A. 2004-2005

28/32

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



## 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.

E i neuroni con risposta più complessa? (Xing and Andersen, 2000).



## Sommario



Codice di popolazione nell'area motoria.

Trasformazione di sistemi di riferimento nell'area parietale