

# Corso di Motor Control and Human Performance Assessment

## Domande d'esame

*Una tipica prova d'esame comprende tipicamente almeno un 'esercizio' (contrassegnato da '\*') e alcune domande. Nella valutazione l'esercizio ha peso almeno doppio di ciascuna delle domande.*

### D. Computational Motor Control

Velocity, Acceleration, Curvature, Arc length, Speed profile. Properties of human movement trajectories: Fitts law, minimum-jerk model, 2/3 power law. Practical applications. Dynamics control. The redundancy problem. Modularity and muscle synergies. Multisensory integration and Sensorimotor integration. Feedforward and feedback control modalities. Optimal feedback control. Sensorimotor adaptation to kinematic/dynamic disturbances. Computational models of adaptation. Motor skill learning. Computational models of skill learning

1. Spiegare la teoria di Marr del sistema nervoso come sistema per l'elaborazione di informazione.
2. Secondo alcune teorie del controllo motorio, esiste una fase di pianificazione dei movimenti separata dalla fase di esecuzione. Quali sono le evidenze sperimentali a supporto di questa ipotesi? Quali sono invece le evidenze contrarie?
3. Descrivere l'effetto McGurk nella percezione del parlato
4. \*Nei movimenti di reaching da punto a punto spesso la performance viene quantificata in termini della lunghezza  $L$  della traiettoria (ascissa curvilinea), della durata complessiva del movimento,  $T$  e della velocità media,  $V$ . Queste tre misure però non sono fra loro indipendenti ossia date due di queste la terza è univocamente determinata. Ricavare la relazione fra  $L$ ,  $T$ ,  $V$ .
5. Che cosa afferma la legge di Fitts per i movimenti dell'arto superiore?
6. \*Per un movimento rettilineo, il modello detto minimum-jerk predice che una traiettoria dal punto  $x_A$  al punto  $x_B$ , di durata  $T$ , è descritta dall'equazione seguente:  $x(t) = x_A + (x_B - x_A) \xi(t/T)$  dove  $\xi(\tau) = \tau^3 (6\tau^2 - 15\tau + 10)$  con  $0 \leq \tau \leq 1$ . Determinare in che modo il valore di picco della velocità dipende dall'ampiezza e dalla durata  $T$  del movimento. Determinare inoltre il valore (minimo) della funzione di costo che il modello minimizza.
7. Quale è la relazione empirica fra velocità e raggio di curvatura negli 'scarabocchi' (movimenti liberi, planari, continui, curvi)? In una traiettoria curva a forma di 8, indicare i punti di massima e di minima velocità
8. Che cosa è il modello minimum-jerk? Per un movimento rettilineo che soddisfa il criterio del minimum-jerk, tracciare gli andamenti qualitativi del profilo di velocità, del profilo di accelerazione e del profilo del jerk.
9. Cosa sono le "interaction forces" o "forze di interazione" durante i movimenti di raggiungimento di un target con il braccio?
10. Che tipo di alterazione nei movimenti di reaching ci possiamo aspettare in soggetti deprivati sensorialmente (niente propriocezione e niente visione del proprio movimento)?
11. In un movimento monoarticolare di flessione, l'attività elettrica dei muscoli agonista (flessore) e antagonista (estensore) ha un caratteristico andamento tri-fasico. Descrivere tale andamento e descrivere la sua interpretazione in termini del modello 'lambda' del controllo motorio.
12. Descrivere l'ipotesi del punto di equilibrio e le sue basi sperimentali.
13. Descrivere come si attivano i muscoli agonista e antagonista durante un semplice movimento di flessione monoarticolare.

14. Spiegare come si può interpretare il pattern trifasico di agonista-antagonista in termini dell'ipotesi di punto di equilibrio.
15. \*Si consideri un problema di integrazione multisensoriale, in cui si vuole stimare l'angolo di rotazione  $q$  di una articolazione in condizioni statiche a partire da due canali sensoriali: (i) visivo, che rileva l'angolo  $q$  contaminato da rumore additivo Gaussiano con media nulla e varianza  $\sigma_v^2$ ; (ii) propriocettivo, che rivela la lunghezza di un muscolo  $l = J_m q$  ( $J_m$  è il braccio del muscolo rispetto a quella articolazione), contaminato da rumore additivo Gaussiano con media nulla e varianza  $\sigma_p^2$ . Ricavare uno stimatore ottimo per  $q$  a partire dalle informazioni visive e propriocettive.
16. \*Si consideri un problema di integrazione multisensoriale, in cui si vuole stimare la configurazione  $q$  dell'arto superiore (vettore degli angoli di rotazione articolare) in condizioni statiche a partire da due canali sensoriali indipendenti: (i) visivo, che rileva la posizione  $x = Jq$  della mano in un piano (con  $x$  vettore 2D e  $J$ , matrice jacobiana, supposta costante), contaminata da rumore additivo  $\varepsilon_v \sim N(0, \Sigma_v)$ ; (ii) propriocettivo, che rivela la lunghezza di un insieme di muscoli  $l = J_m q$  ( $J_m$  è la matrice dei bracci dei muscoli, supposti costanti, rispetto a ciascuna articolazione), contaminato da rumore additivo  $\varepsilon_p \sim N(0, \Sigma_p)$ . Dopo aver ricavato uno stimatore ottimo per  $q$  a partire dalle informazioni visive e propriocettive:
- Determinare la varianza di tale stima
  - Come si modifica lo stimatore se alcuni muscoli sono sottoposti a vibrazione? [La vibrazione può essere modellizzata introducendo un valore medio  $\mu$  non nullo nel rumore propriocettivo:  $\varepsilon_p \sim N(\mu, \Sigma_p)$ ].

#### Soluzione D.9

Lo stimatore ottimo (massima verosimiglianza) è dato da:

$$\hat{q} = \left( J^T S_v^{-1} J + J_m^T S_m^{-1} J_m \right)^{-1} \left( J^T S_v^{-1} x + J_m^T S_m^{-1} l \right)$$

a. Per calcolare la varianza della stima occorre prima calcolarne la media:

$$E\{\hat{q}\} = E\left\{ \left( J^T S_v^{-1} J + J_m^T S_m^{-1} J_m \right)^{-1} \left( J^T S_v^{-1} (Jq + e_v) + J_m^T S_m^{-1} (J_m q + e_m) \right) \right\} = q$$

Si ha poi che:

$$(\hat{q} - E\{\hat{q}\}) = \left( J^T S_v^{-1} J + J_m^T S_m^{-1} J_m \right)^{-1} \left( J^T S_v^{-1} e_v + J_m^T S_m^{-1} e_m \right)$$

e quindi:

$$\text{cov}(\hat{q}) = E\{(\hat{q} - E\{\hat{q}\})(\hat{q} - E\{\hat{q}\})^T\} = \left( J^T S_v^{-1} J + J_m^T S_m^{-1} J_m \right)^{-1} \left( J^T S_v^{-1} e_v + J_m^T S_m^{-1} e_m \right) \left( J^T S_v^{-1} e_v + J_m^T S_m^{-1} e_m \right)^T \left( J^T S_v^{-1} J + J_m^T S_m^{-1} J_m \right)^{-1}$$

da cui semplificando:

$$\text{cov}(\hat{q}) = \left( J^T S_v^{-1} J + J_m^T S_m^{-1} J_m \right)^{-1} \begin{pmatrix} J^T S_v^{-1} J & 0 \\ 0 & J_m^T S_m^{-1} J_m \end{pmatrix} \left( J^T S_v^{-1} J + J_m^T S_m^{-1} J_m \right)^{-1}$$

c. Se si aggiunge un bias nel canale propriocettivo la stima di  $q$  diventa:

$$\hat{q} = \left( J^T S_v^{-1} J + J_m^T S_m^{-1} J_m \right)^{-1} \left( J^T S_v^{-1} x + J_m^T S_m^{-1} (l - m) \right)$$

17. Una predizione del modello 'optimal feedback control' applicato ai movimenti umani è che la variabilità dei movimenti sia più elevata per gli aspetti del movimento che non sono rilevanti per il particolare task. Spiegare illustrando qualche semplice esempio.
18. \*In un test percettivo a un soggetto è richiesto di posizionare ripetutamente il suo dito su un target  $(x,y)$ . Il soggetto non può vedere il suo braccio, quindi il posizionamento si basa esclusivamente su informazioni propriocettive. Da una serie di misure ripetute si ricavano le varianze della componente  $x$  e  $y$  della posizione finale del dito ( $\sigma_x^2$  e  $\sigma_y^2$ ). Supponendo che gli errori nelle due direzioni siano indipendenti, che il braccio sia planare con due gradi di libertà e che siano note le dimensioni di braccio e avambraccio ( $L_1$  e  $L_2$ ). Si supponga inoltre che le informazioni propriocettive (rotazioni di spalla e gomito) abbiano uno stesso livello di affidabilità,  $\sigma_q^2$ . Determinare quest'ultima quantità in funzione di  $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  e della configurazione  $q$  del braccio.
19. \*In un esperimento si vuole studiare come vengono integrate le informazioni visive e propriocettive quando l'arto superiore, completamente esteso, è ruotato (addotto-abdotto) attorno alla spalla su un piano orizzontale. Il braccio è modellabile come un cilindro rigido di massa  $m$  (distribuita uniformemente) e lunghezza  $L$  che ruota rispetto a un asse fissato, sotto l'effetto di una coppia muscolare  $\tau$ . Il sistema sensoriale è costituito di due componenti, una visiva (in ogni istante l'occhio rileva l'orientazione  $q$  e la velocità di rotazione  $q'$  del braccio) e una propriocettiva, in cui i recettori di stiramento dei muscoli rispettivamente adduttori e abduttori rilevano un segnale proporzionale rispettivamente alla loro variazione di lunghezza (recettori tonici) e alla loro velocità di stiramento (recettori fascici). Si supponga che il braccio dei muscoli adduttori/abduttori rispetto alla spalla sia costante e pari a  $J_m$ . Definire un modello dinamico lineare dell'arto superiore e del suo sistema sensoriale e calcolare i parametri ( $A, B, C, D$ ) del sistema. Nel caso che il braccio sia mantenuto in posizione statica, determinare uno stimatore ottimo per la sua orientazione.
20. Si consideri un problema di integrazione multisensoriale, in cui si vogliono stimare gli angoli di rotazione  $\Delta q$  delle articolazioni in condizioni statiche a partire da due canali sensoriali: (i) visivo, che rileva lo spostamento  $\Delta x$  corrispondente alla rotazione  $\Delta q$ :  $\Delta x = J \Delta q + \varepsilon_v$ , dove  $\varepsilon_v$  è un rumore additivo Gaussiano con media nulla e varianza  $\Sigma_v$ ; (ii) propriocettivo, che rileva l'allungamento  $\Delta l$  dei muscoli:  $\Delta l = J_m \Delta q + \varepsilon_p$ , dove  $J_{mij}$  è il braccio del muscolo  $i$  rispetto all'articolazione  $j$  e  $\varepsilon_p$  è un rumore additivo Gaussiano con media nulla e varianza  $\Sigma_p$ . Ricavare uno stimatore ottimo per  $\Delta q$  a partire dalle informazioni visive e propriocettive. [NB: Le quantità  $\Delta x$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta x$  sono vettori]
21. Elencare almeno due argomenti (evidenze sperimentali) a sostegno della tesi che il cervelletto è coinvolto nell'apprendimento dei movimenti.
22. Nell'adattamento a campi di forza instabili si osserva un aumento progressivo e selettivo della stiffness nelle direzioni del campo. Lo stesso aumento si osserva però anche nell'adattamento a campi di forza velocity-dependent. Perché?
23. Per monitorare i processi di adattamento a campi di forza si possono usare due tecniche: 'catch trial' oppure 'error clamp'. Descrivere queste tecniche e spiegare che cosa misurano facendo riferimento a un semplice modello lineare della dinamica trial-by-trial dell'apprendimento.
24. \*In un esperimento di adattamento sensomotorio vengono effettuati movimenti di reaching da punto a punto sotto l'effetto di una forza  $f$  che devia lateralmente (in senso anti-orario) le traiettorie. Detto  $y$  l'errore di direzione del movimento (differenza fra direzione del target e direzione verso cui ci si muove), durante l'adattamento viene gradualmente sviluppato un comando correttivo  $x$  che tende ad annullare l'effetto della perturbazione di forza. Il processo di adattamento della direzione del movimento risulta essere guidato dall'errore di direzione (maggiore errore di direzione, maggiore modificazione della direzione del movimento).

- a. Determinare le equazioni (sistema lineare a tempo discreto) della dinamica trial-by-trial del processo di adattamento di cui sopra.
  - b. Si supponga che la forza sia introdotta all'istante  $t=0$  e che sia inizialmente  $x(0)=0$ ,  $y(0)=0$ . Supponendo che la forza sia mantenuta costante per tutto l'adattamento, determinare il valore asintotico di  $x$  e di  $y$  predetti dal modello.
  - c. Visualizzare graficamente gli andamenti temporali di  $x(t)$  e  $y(t)$
25. \*In un esperimento di adattamento visuomotorio, vengono effettuati movimenti di reaching da punto a punto ma le traiettorie sono visualizzate introducendo una rotazione  $r$ . Detto  $y$  l'errore di direzione e  $x$  la direzione del movimento, il processo di adattamento della direzione del movimento risulta essere guidato dall'errore di direzione (maggiore errore di direzione, maggiore modificazione della direzione del movimento).
- d. Determinare le equazioni (sistema lineare a tempo discreto) della dinamica trial-by-trial del processo di adattamento di cui sopra.
  - e. Si supponga che la rotazione sia introdotta all'istante  $t=0$  e che sia inizialmente  $x(0)=0$ ,  $y(0)=0$ . Supponendo che la rotazione sia mantenuta costante per tutto l'adattamento, determinare il valore asintotico di  $x$  e di  $y$  predetti dal modello.
  - f. Visualizzare graficamente gli andamenti temporali di  $x(t)$  e  $y(t)$
26. \*In un esperimento di adattamento sensomotorio vengono effettuati movimenti di reaching da punto a punto. Il robot genera una perturbazione di forza  $f$ , che ha l'effetto di deviare lateralmente le traiettorie. Detto  $y$  l'errore di direzione, il processo di adattamento della predizione ('modello interno'),  $x$ , delle conseguenze della perturbazione di forza risulta essere guidato dall'errore di direzione (maggiore errore di direzione, maggiore adattamento). Inoltre, ad ogni ripetizione del movimento il modello interno decade con un fattore di 'dimenticanza'  $0 < A < 1$ .
- g. Determinare le equazioni (sistema lineare a tempo discreto) della dinamica del processo di adattamento sotto le ipotesi di cui sopra, descrivendo il significato dei parametri
  - h. Supponendo che  $f$  sia mantenuta costante per tutto l'adattamento, determinare il valore asintotico di  $x$  e di  $y$  predetti dal modello (ossia,  $x_\infty$  e  $y_\infty$ ) in funzione dei parametri di quest'ultimo
  - i. Una volta raggiunto il regime (comportamento asintotico), si supponga che per quattro trial consecutivi l'errore venga cancellato (error clamp) con un vincolo meccanico – ossia il robot impedisce 'fisicamente' la deviazione laterale, per cui  $y=0$ . Determinare il valore di  $x$  alla fine del quarto trial di questo tipo e la corrispondente forza che il braccio eserciterà sul vincolo.

#### Soluzione E.6

Equazione del processo di adattamento:

$$\begin{cases} y_i = Df_i - x_i \\ x_{i+1} = Ax_i + By_i \end{cases}$$

con  $A$  retention rate,  $B$  learning rate,  $D$  compliance

b. Il valore asintotico di  $x$  è dato da:

$$(1 - A)x_\infty = B(Df - x_\infty)$$

da cui:

$$x_{\infty} = \frac{BD}{(1-A)+B} f$$

c. Se  $x_0 = x_{\infty}$  e l'errore è mantenuto nullo, si ha:

$$x_4 = Ax_3 = A^2x_2 = A^3x_1 = A^4x_0$$

27. In un esperimento vengono eseguiti movimenti di reaching center-out verso un target posto nella direzione  $\theta(t)$ , dove  $t$  è il numero del movimento (trial). Sia  $h(t)$  la direzione effettiva della traiettoria della mano, e  $c(t)$  la traiettoria del cursore visualizzato sullo schermo di un computer. Nella visualizzazione viene introdotta una rotazione angolare  $r(t)$ , per cui  $c(t)$  sarà differente da  $h(t)$ . Il sistema motorio sviluppa gradualmente un 'modello',  $\hat{r}(t)$ , della perturbazione ( $r(t)$ ), la cui evoluzione dipende dal valore della perturbazione al trial precedente e dalla discrepanza (errore) fra la direzione del target e la direzione della traiettoria del cursore (maggiore errore, maggiore modificazione del modello).

- Determinare la relazione fra l'errore di direzione del movimento,  $y(t) = \theta(t) - c(t)$ , la perturbazione  $r(t)$  e la direzione del movimento della mano.
- Il modello  $\hat{r}(t)$ , della perturbazione viene usato per calcolare la direzione  $h(t)$  del movimento della mano. Come deve essere quest'ultima per minimizzare l'effetto della perturbazione?
- Determinare l'equazione (sistema lineare a tempo discreto) dell'evoluzione trial-by-trial del 'modello interno'  $\hat{r}(t)$  della perturbazione.
- Si supponga che la rotazione sia introdotta all'istante  $t=0$  e che sia inizialmente  $\hat{r}(0) = 0$ , e  $c(0) = \theta(0)$ . Supponendo che la rotazione sia mantenuta costante per tutto l'adattamento, determinare il valore asintotico di  $y(t)$  (errore visivo) e di  $\hat{r}(t)$  predetti dal modello.
- Visualizzare graficamente gli andamenti temporali di  $y(t)$  e  $\hat{r}(t)$ .

[NB: Tutte le variabili sono misure angolari. Considerare come positivo il verso antiorario]