

Il controllo posturale: il problema della stabilità

Pietro G. Morasso

Università di Genova – DIST

Centro di Bioingegneria della Colletta



Le problematiche

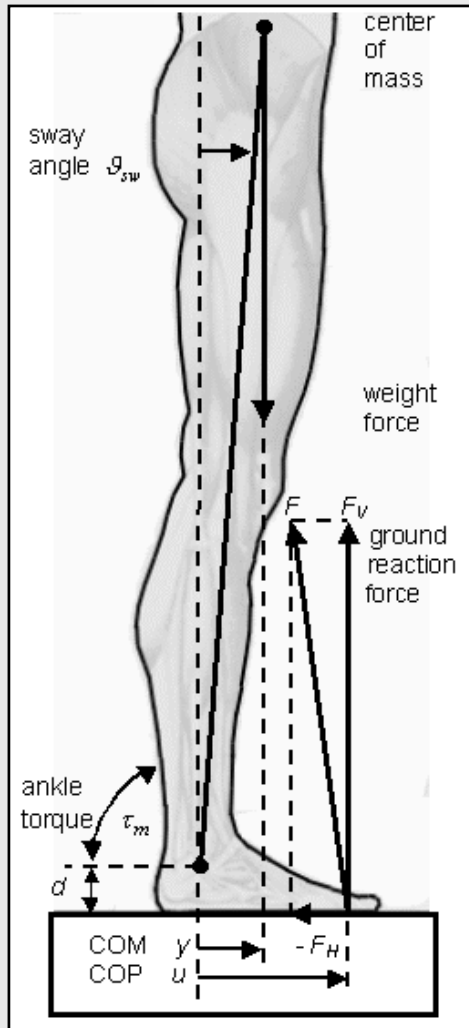
La stabilizzazione del pendolo invertito umano in condizioni di riposo è un problema complesso che richiede un controllo centrale ed un'integrazione sensoriale articolata.

La posturografia statica e dinamica danno due tipi di informazione complementari, che non sono riducibili l'una all'altra.

L'interesse clinico dell'analisi stabilometrica e quindi del buon vecchio test di Romberg deriva dal fatto che può rivelare l'organizzazione spazio-temporale del controllo motorio e l'efficienza sensorimotoria.



BIOMECCANICA



Le variabili in gioco:

1. Centro di massa (COM)
2. Centro di spinta (COP)
3. Forza di gravità (applicata al COM)
4. Reazione del terreno (applicata al COP)
5. Coppia muscolare alla caviglia

Posturogramma: andamento del COP al variare del tempo (componente AR e ML)

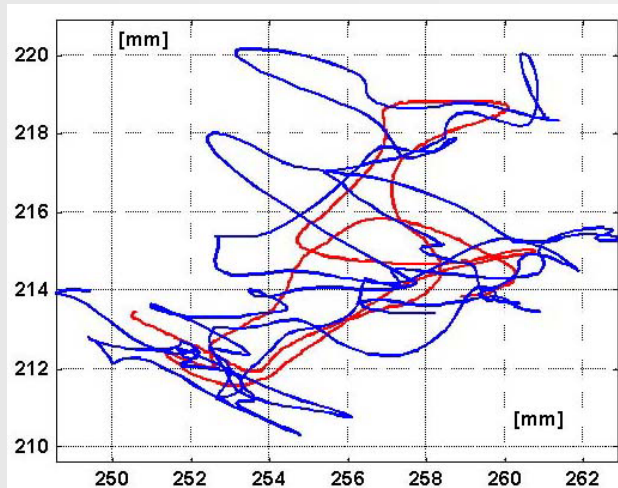
Statocinesigramma: evoluzione delle due componenti del COP (AR e ML) sulla base di appoggio

BIOMECCANICA – cinematica delle oscillazioni posturali (sway)

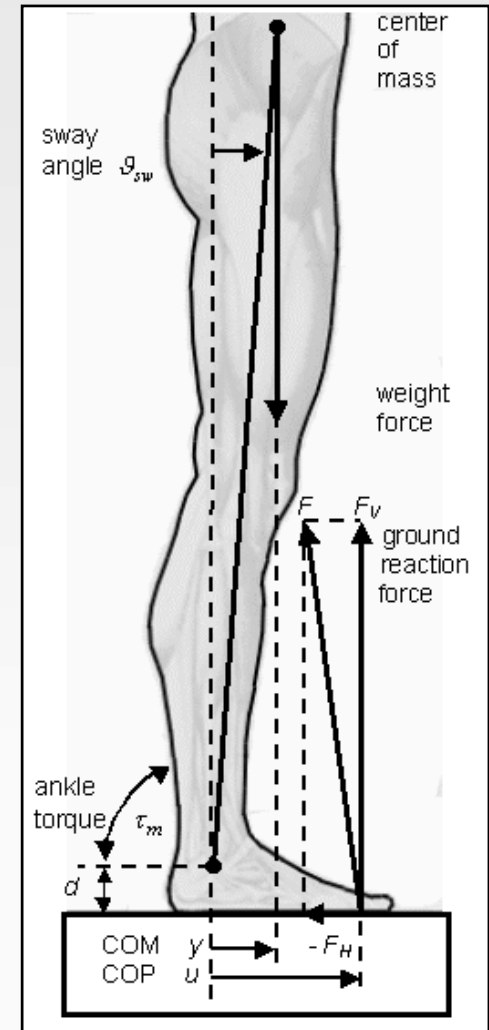
Anche durante il mantenimento della postura eretta in condizioni di quiete ci sono delle oscillazioni del COM e del COP sulla base di appoggio.

Le variazioni del COM sono un effettivo movimento di tutta la massa corporea.

Le variazioni del COP sono proporzionali alla coppia muscolare della caviglia e quindi non rappresentano alcun movimento



COM ≠ COP



BIOMECCANICA – dinamica delle oscillazioni posturali

La componente orizzontale della reazione del terreno è proporzionale all'accelerazione del COM.

Rispetto alla caviglia, il COM è il braccio di leva della forza di gravità e il COP è il braccio di leva della reazione del terreno.

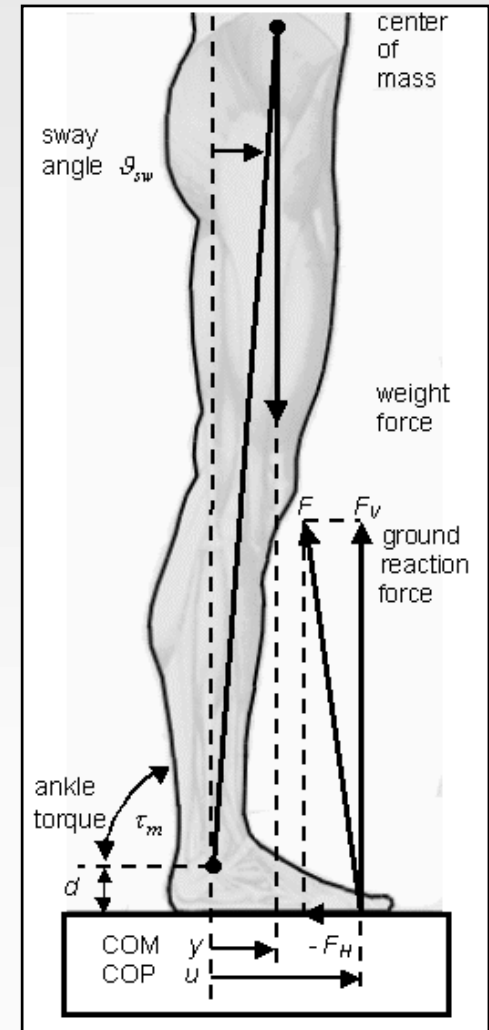
La differenza COM-COP è proporzionale alla accelerazione del COM:

$$\text{accelerazione del COM} = \frac{g}{h} (\text{COM} - \text{COP})$$

COM è la **variabile controllata**

COP è la **variabile di controllo**

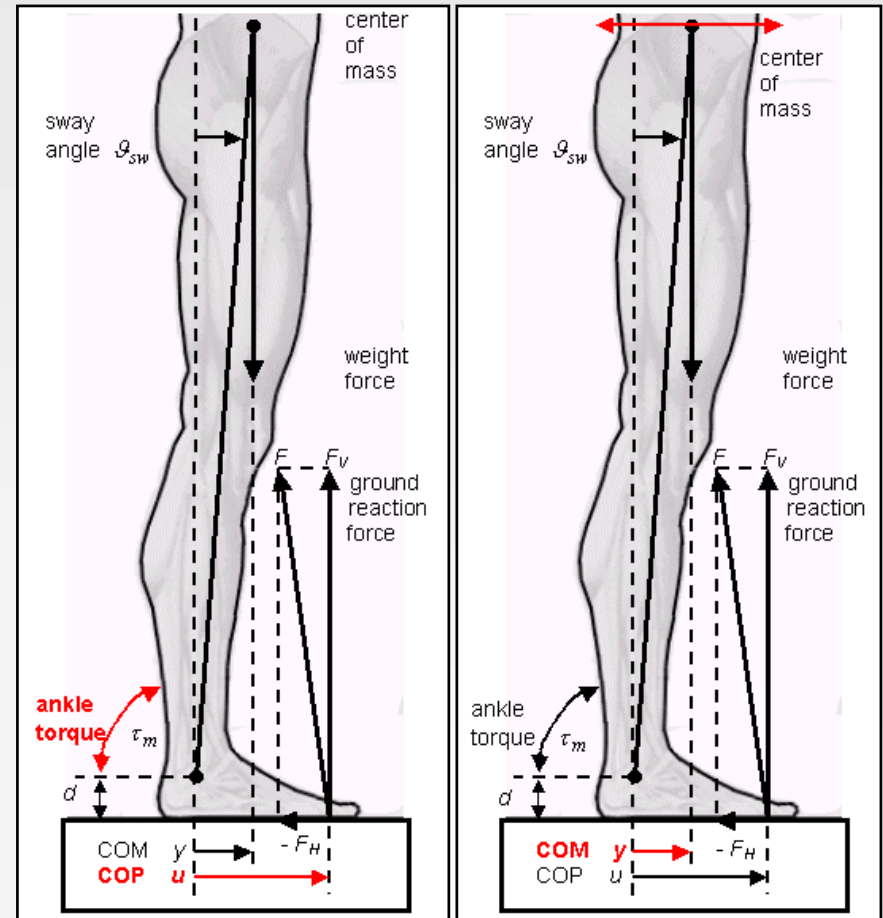
L'instabilità deriva dal fatto che una differenza COM-COP positiva accelera positivamente il COM e viceversa se la differenza è negativa.



STRATEGIE DI STABILIZZAZIONE POSTURALE

Per impedire alla differenza COM-COP di alimentare la naturale tendenza a cadere, due sono i possibili meccanismi di controllo:

1. Agire sul COP modulando l'attivazione dei muscoli della caviglia (**strategia di caviglia**): *meccanismo diretto e veloce*
2. Agire sul COM mediante spostamenti relativi di parti del corpo (**strategia di anca** o più in generale strategia di bilanciamento "distale"): *meccanismo indiretto e lento*



**Strategia prossimale
o di caviglia**

**Strategia distale
o di anca**

MECCANISMI DI STABILIZZAZIONE POSTURALE

Esistono 3 possibili meccanismi di stabilizzazione:

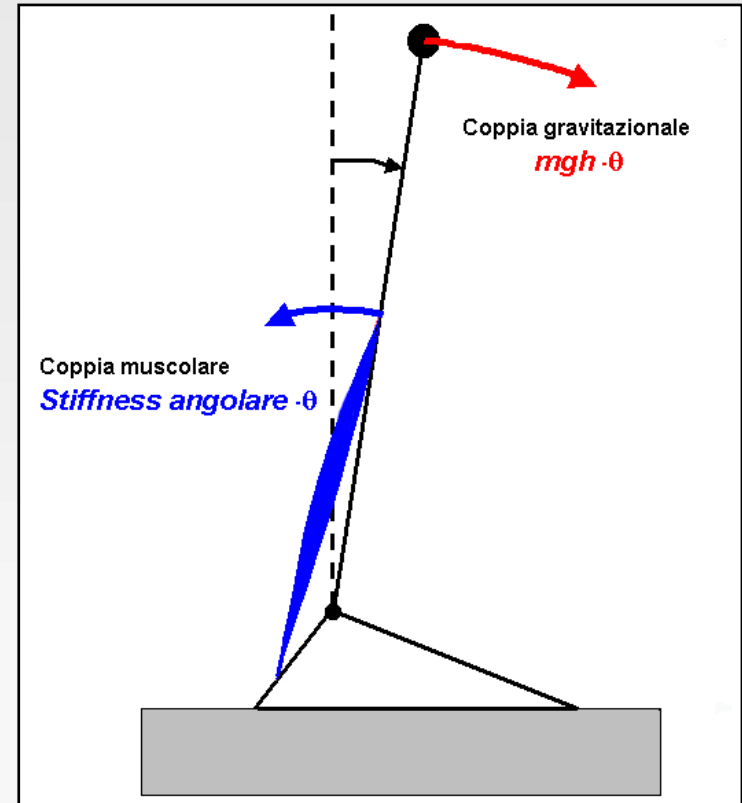
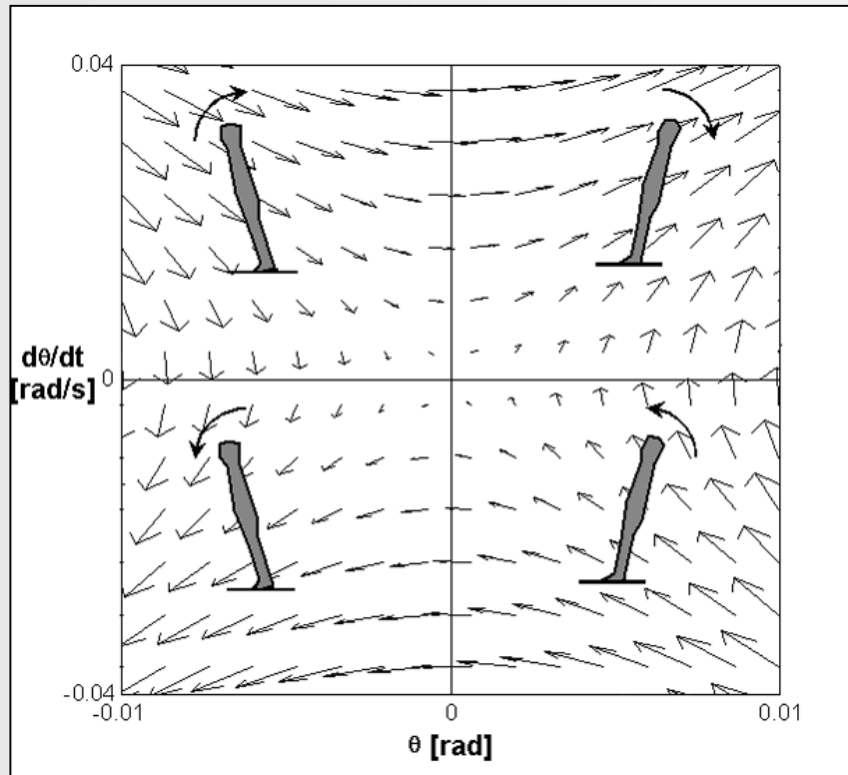
1. **Meccanismo fisico**, legato alla stiffness muscolare: si tratta di un controllo a feedback implicito, che agisce istantaneamente, senza ritardo.
2. **Meccanismo reattivo**, determinato da diversi tipi di riflessi agenti in modo indipendente: si tratta di un controllo in catena chiusa o a feedback, che agisce con i significativi ritardi di propagazione del segnale nervoso (diverse decine di millisecondi).
3. **Meccanismo anticipativo**, di natura integrativa e di tipo centrale: si tratta di un meccanismo di controllo in catena aperta o a feedforward basato su un modello interno di fusione sensoriale e di predizione della dinamica, in grado di annullare i ritardi di trasduzione e propagazione delle informazioni sensoriali.



STABILIZZAZIONE POSTURALE: *la stiffness muscolare*

C'è un valore critico di stiffness muscolare dovuto alla coppia gravitazionale: mgh

La stiffness angolare dei muscoli della caviglia è inferiore al valore critico di circa il 50%

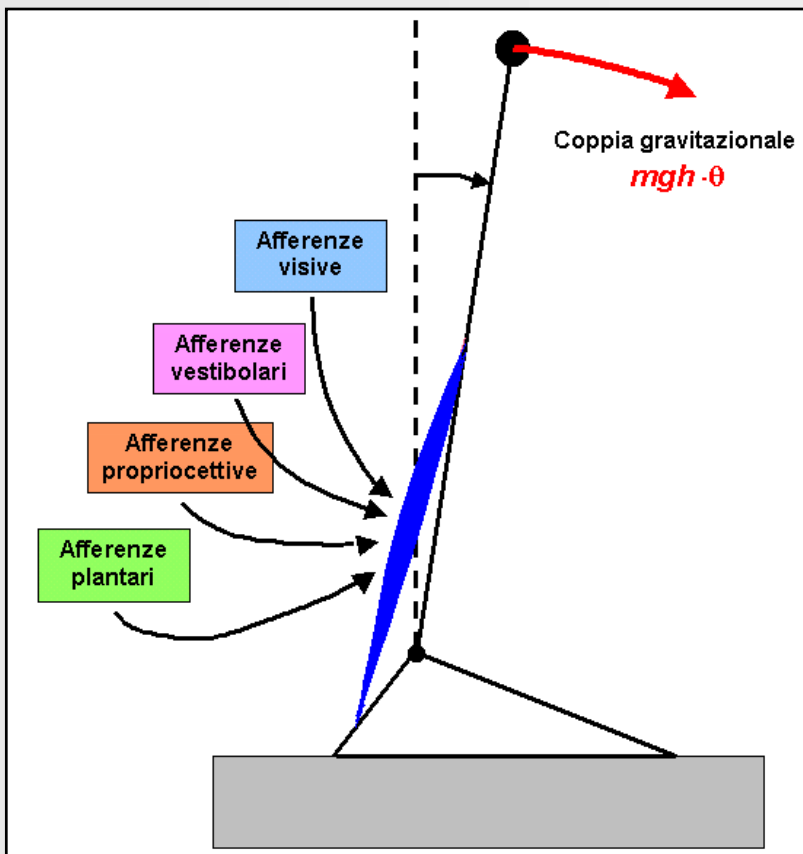


La stiffness muscolare non è sufficiente a stabilizzare la postura eretta

STABILIZZAZIONE POSTURALE: *controllo a feedback*

E' noto che la postura è sotto il controllo di afferenze visive, vestibolari, propriocettive e tattili.

Domanda: queste informazioni sono in grado di stabilizzare la postura eretta a riposo in modo reattivo ovvero con un controllo a feedback?

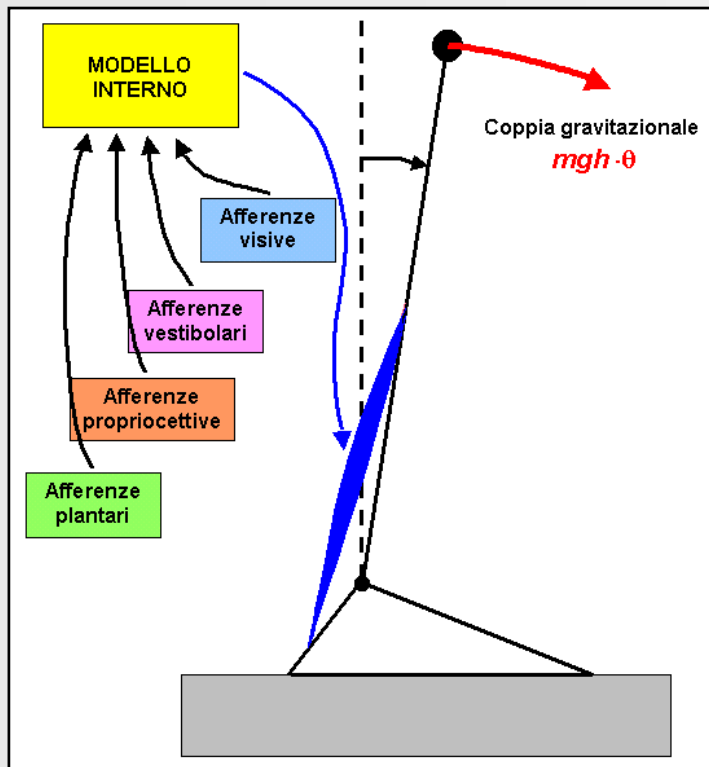


Risposta: no per 3 motivi.

1. Motivo cibernetico A: un controllo a feedback con i ritardi tipici dei riflessi spinali è instabile.
2. Motivo cibernetico B: i canali afferenti non danno informazioni specifiche sulla posizione del COM.
3. Motivo neurobiologico: a parte il canale tattile, gli altri canali sono sotto soglia.

STABILIZZAZIONE POSTURALE: *controllo feedforward*

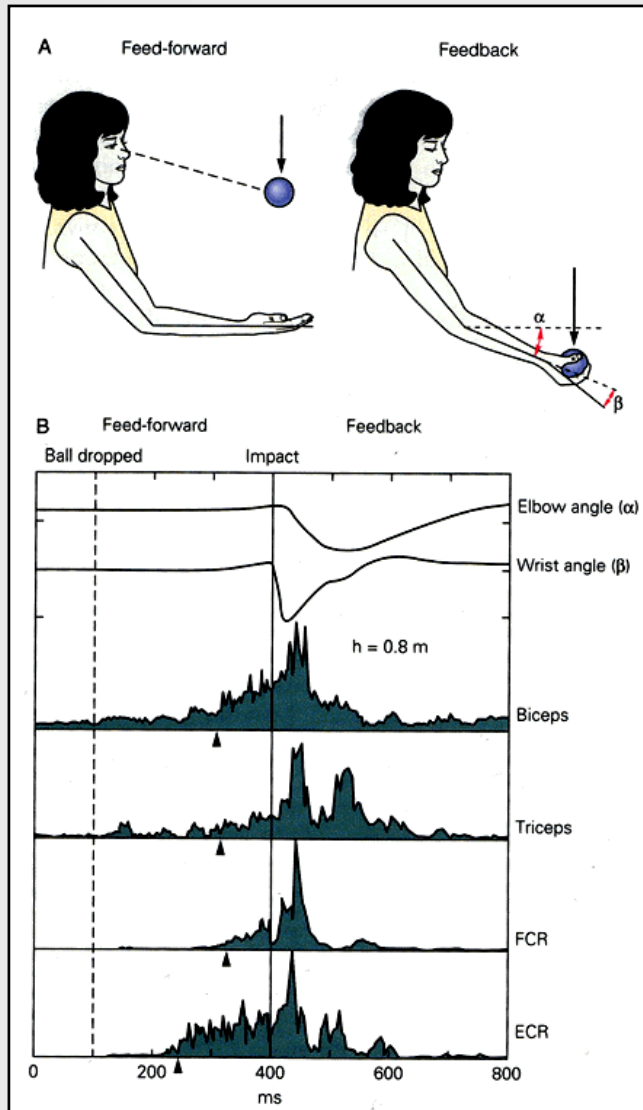
In un controllo feedforward le afferenze sensoriali non sono direttamente inviate alla circuiteria neuromotoria ma ad un centro neurale associativo che svolge funzioni di *modello interno* della biomeccanica e della fisica del mondo esterno.



Paradosso cibernetico: in un controllo feedforward i ritardi di propagazione sono superiori a quelli di un controllo feedback ma la risposta è anticipativa, compensando il ritardo con la predizione.

La predizione è efficace soltanto se i disturbi sono prevedibili e la loro dinamica è stata appresa.

CONTROLLO FEEDFORWARD: *un meccanismo diffuso*



Afferrare una palla al volo.

Il modello interno permette di:

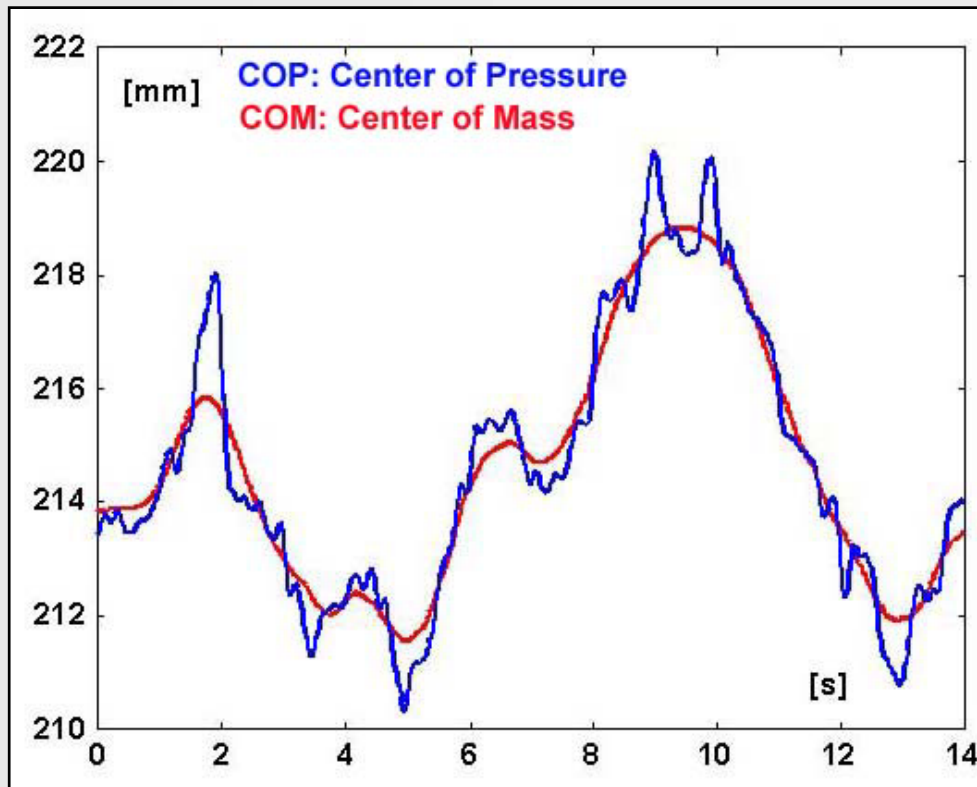
1. Valutare l'istante di impatto
2. Attivare i muscoli anticipatamente in modo da prepararsi all'impatto

Successivamente all'impatto il controllo feedback permette di:

1. Adattarsi a dettagli imprevisti
2. Fornire informazioni al controllore feedforward per migliorare il modello interno

Controllo posturale anticipativo: evidenze stabilometriche

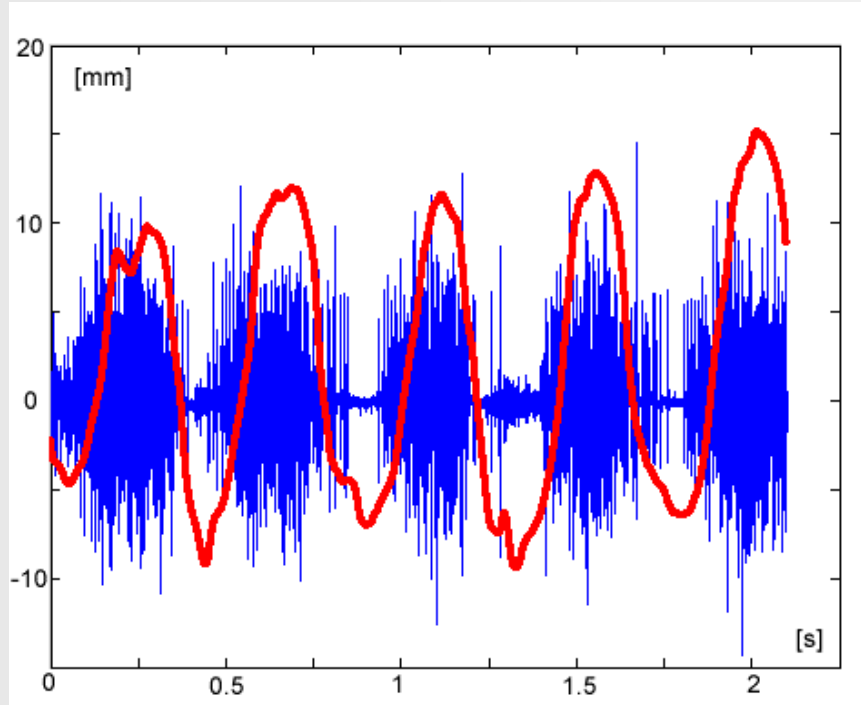
La valutazione della correlazione tra andamento del COP e l'andamento del COM rivela che le due grandezze sono in fase.



Poiché il COP è la variabile di controllo e il COM è la variabile controllata, il meccanismo di controllo che genera le attivazioni muscolari da cui scaturisce il COP non può che essere di tipo anticipativo ossia a feedforward.

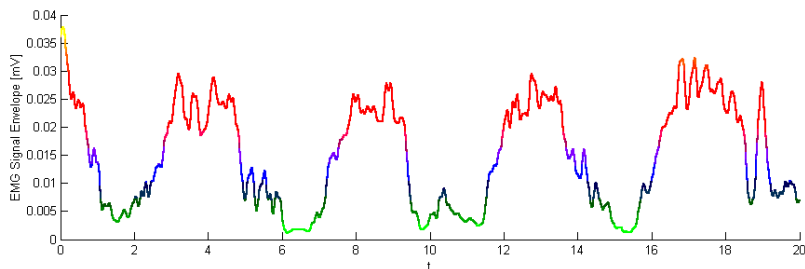
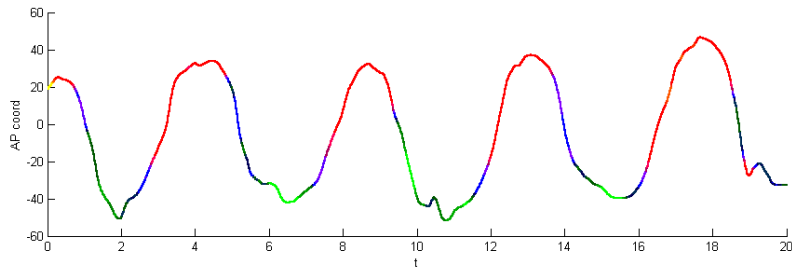
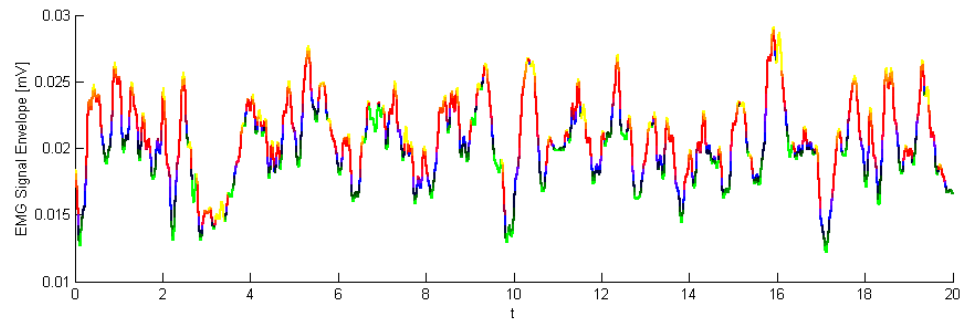
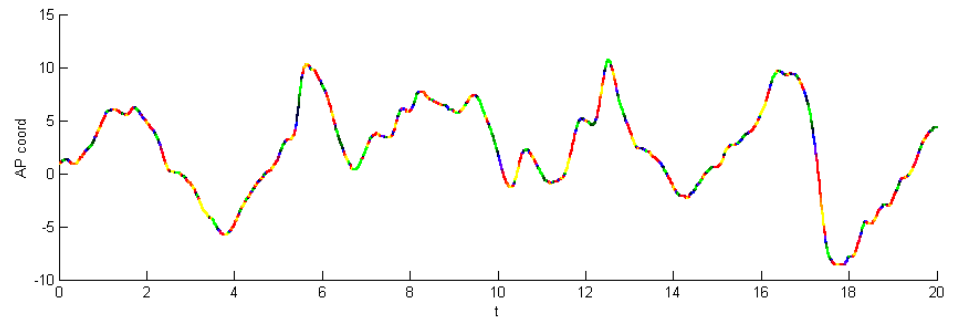
Controllo posturale anticipativo: evidenze elettromiografiche

La valutazione della correlazione tra andamento del COP e l'andamento dell'attività elettromiografica dei muscoli della caviglia rivela che le l'attività del muscolo precede e non segue il COP.

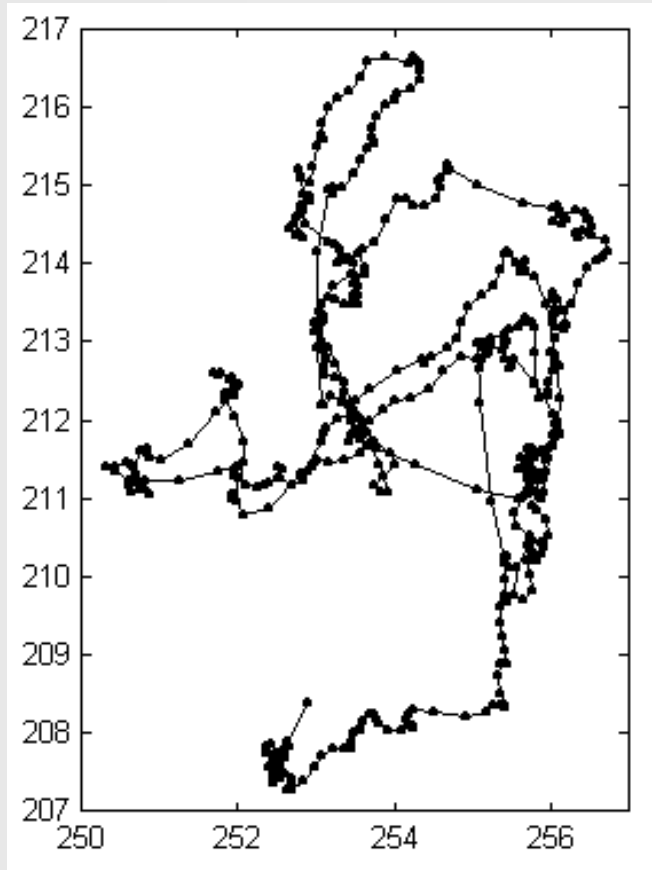


Ne consegue che l'attivazione muscolare è anticipativa e non riflessa.

Controllo posturale anticipativo: evidenze elettromiografiche

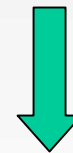


Controllo posturale anticipativo: *struttura del posturogramma*



L'analisi del posturogramma rivela una struttura regolare, nascosta dall'apparenza casuale:

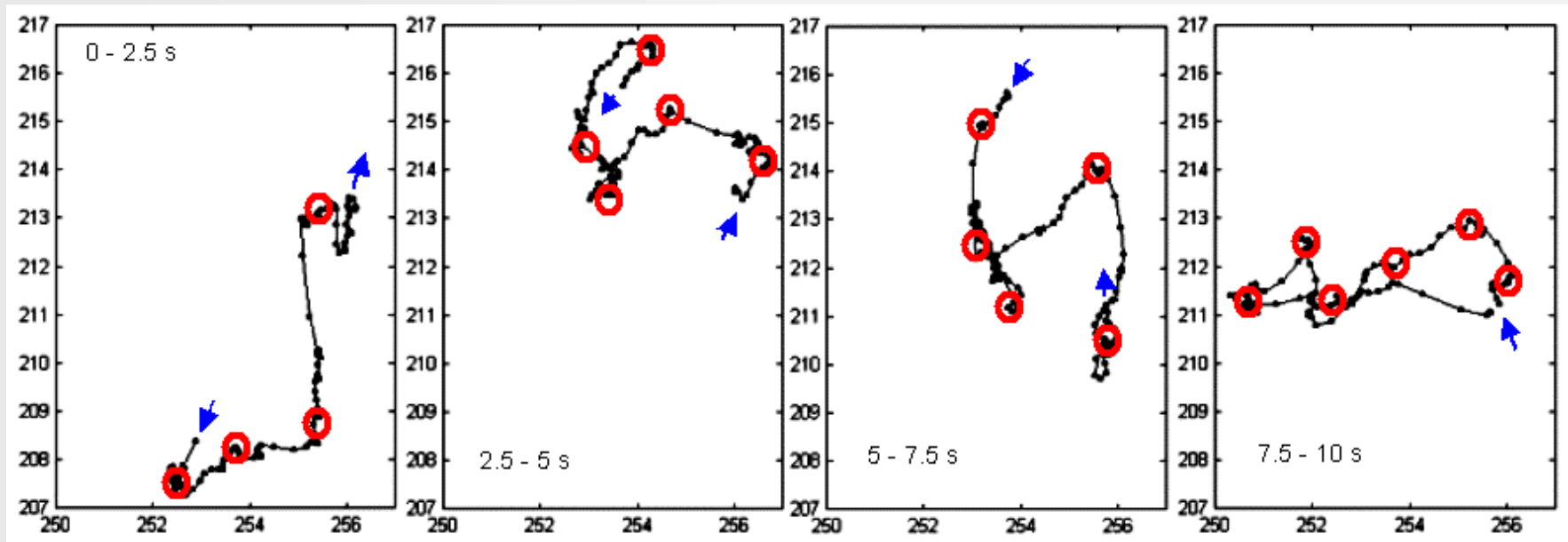
1. aree di addensamento dei campioni
2. fasi di spostamento rapido da un cluster all'altro



Definizione di curva di Sway-Density

Controllo posturale anticipativo: *parametri di sway-density*

- Identificazione dei picchi di addensamento del posturogramma
- Calcolo dei parametri di sway-density:
 1. Ampiezza dei picchi di addensamento
 2. Distanza tra i picchi
 3. Intervallo temporale tra i picchi



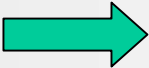
Controllo posturale anticipativo: organizzazione temporale

L'intervallo temporale tra i picchi di sway density è un invariante molto stabile che non correla con la patologia e dipende soltanto dalla biomeccanica: $0.6 \pm 0.04 s$

L'ampiezza dei picchi e la distanza tra i picchi correlano con la patologia



Il controllo posturale anticipativo si configura come una sequenza di cadute controllate, stabilizzate da precisi e rapidi spostamenti del COP

Il deficit di controllo posturale deriva principalmente da un' deficienza delle informazioni sensoriali che non permettono al modello interno di operare con precisione  ne deriva un maggiore ricorso alla stiffness e al controllo a feedback a livello dell'anca.

