

LEZIONE 15/09/20

01 - DINAMICA E SINERGIE

Il nostro sistema motorio può essere visto come una macchina automotrice. Possiamo considerare le componenti del sistema umano (p. 13-14 libro):

- Struttura di sostegno (scheletro): funzione di supporto e protezione organi interni
- Sistema motore distribuito (muscoli): nelle zone dove servono le azioni meccaniche
- Sistema dell'alimentazione (polmoni, sangue, ossigeno)
- Serbatoio di combustibile (zuccheri, amidi grassi): tessuti adiposi
- Sistema di regolazione automatica (ghiandole endocrine, ormoni): regolano funzioni vegetative, come equilibri acido base, la temperatura
- Sistema di comando (sistema nervoso)
- Sistema di trasmissione meccanica (tendini e sistemi di leve): muscoli devono trasmettere la loro potenza all'esterno.
- Sistema di sospensioni e di propulsione (arti inferiori)
- Sistema di controllo dell'assetto (sistemi vestibolare, somatosensoriale, propriocettivo, visivo)
- Sistema di retroazioni (afferenze sensoriali): tutti quei segnali che il sistema nervoso percepisce dall'esterno del corpo o del sistema nervoso. Permette di mettere in atto delle azioni in risposta ai segnali percepiti.
- Sistema di protezione da eventi lesivi (riflessi protettivi, di regolazione termica, sistema dolorifico): sistemi importanti per la sopravvivenza del soggetto. Patologie che comportano danno a funzione dolorifica sono molto rare → nell'evoluzione non hanno avuto sviluppo.
- Sistema di autoriparazione

Inoltre, trasporta a bordo un sistema di esplorazione dell'ambiente (sistemi tattile, visivo, acustico), un sistema meccanico per la manipolazione di oggetti (arti superiori).

Studio dell'apparato locomotore umano è svolto nell'ambito della fisiologia, quindi è molto vicina al nostro concetto di ingegneria. C'è quindi un problema di terminologia: dobbiamo trovare equivalenti in ingegneria di termini fisiologici. In fisiologia di solito si parla in termini abbastanza qualitativi (traumi, lesioni, patologia), mentre in ingegneria si parla in termini più precisi (cedimenti strutturali, guasti del sistema...)

Termini Clinici	Equivalente ingegneristico
Postura (assetto del corpo in una particolare situazione)	Posizione (insieme di coordinate spaziali associate ai gradi di libertà del sistema articolato)
Gesto o atto motorio (azione elementare finalizzata al raggiungimento di uno scopo)	Cambiamento di posizione in funzione del tempo (andamento temporale delle variabili cinematiche)
Funzione motoria (capacità di compiere atti motori)	Capacità di azionare gli attuatori in modo coordinato; presuppone la capacità di trasformare energia chimica in energia meccanica

p.15 libro

Esistono atti motori caratterizzati dalla ripetizione ciclica delle sequenze di cambiamento di assetto (atti motori periodici), e atti motori transitori (non periodici).

Tipi di atti motori:

- Periodici (cammino, corsa)
- Transitori o non periodici (alzarsi dalla sedia, iniziare il cammino, manipolazione di oggetti)

- Di carattere vegetativo (battito cardiaco, respirazione, peristalsi)
- Protettivo (riflessi da evitamento)
- Di comunicazione verbale (fonazione) e non verbale (mimica facciale, gesticolazione)

Parti del corpo coinvolte

- Arti superiori e inferiori
- Gabbia toracica
- Volto
- Occhi e testa, sistema della fonazione
- Viscere
- Cuore e sangue

Biomeccanica (def.): è la scienza che studia le strutture e le funzioni dei sistemi biologici utilizzando i metodi della meccanica. Applicazione della meccanica classica ai sistemi biologici. Scienza che esamina le forze che agiscono sulle strutture biologiche e analizza gli effetti prodotti da queste forze.

Postura: assetto o atteggiamento che il corpo assume in una particolare situazione – posizione del sistema articolato.

La postura e il movimento umano (p.16 libro)

Il **movimento umano** viene eseguito mediante il cambiamento del sistema di forze che precedentemente manteneva l'equilibrio statico del corpo o di una sua parte (primo principio della dinamica: un corpo mantiene il proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, finché una forza non agisce su di esso).

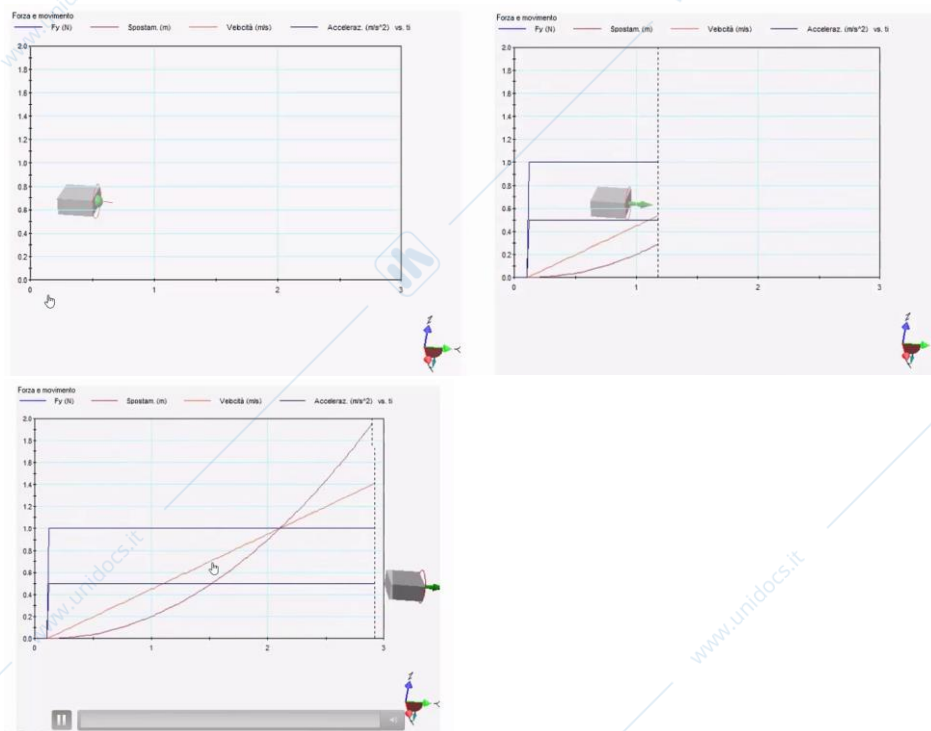
Forze esterne: forze nuove applicate o diminuzione di forze già esistenti.

Forze interne: forze muscolari, ma anche forze che si trasmettono tra le ossa. Le forze interne a un sistema composto da tante masse non sono in grado di spostare il centro di massa del sistema → molto importante. Quando spostiamo il centro di massa lo possiamo fare perché ci sono delle forze esterne.

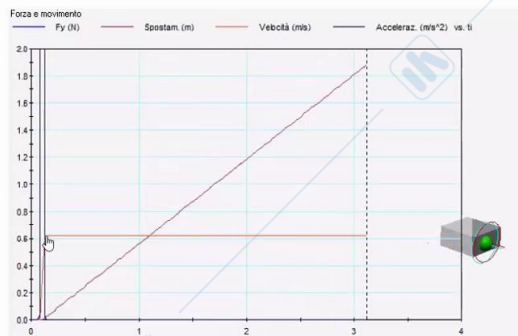
I muscoli

Gli organi in grado di modificare queste forze in tempi brevi sono i muscoli, i quali agiscono generalmente sotto l'azione di comandi motori ricevuti dal sistema nervoso centrale o periferico. Sistema di afferenze sensoriali: segnali che provengono dalla periferia e che vanno al SNC. I comandi dei muscoli vengono adattati a seconda dell'info che viene ricevuta dalla periferia → sistema di retroazione.

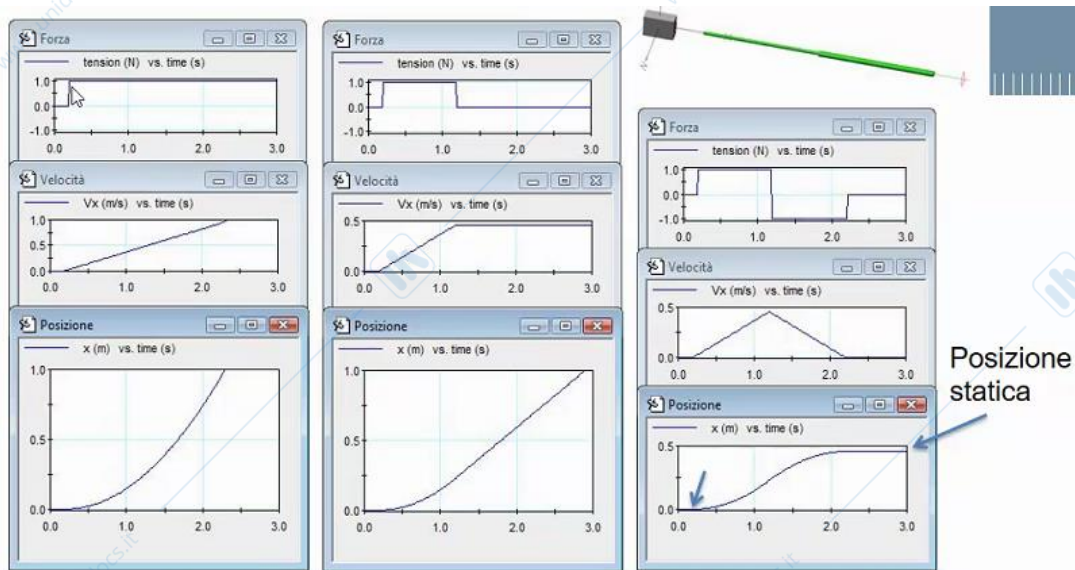
Forza e movimento



A forza cost corrisponde una accelerazione costante alla quale corrisponde una velocità crescente linearmente nel tempo, e lo spostamento cresce quadraticamente nel tempo.

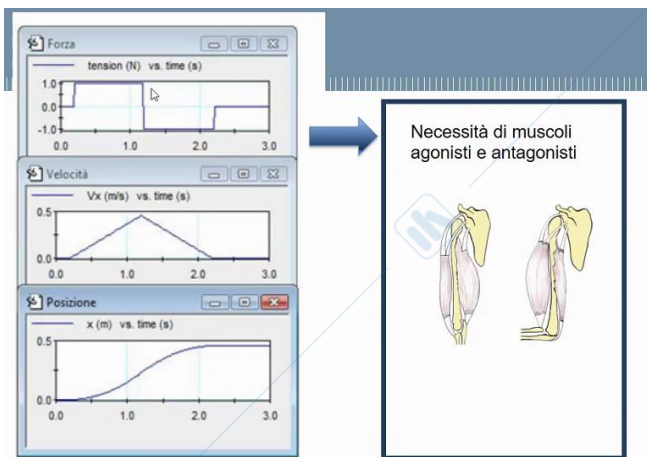


Forza impulsiva: velocità costante (non agiscono altre forze). Spostamento cresce linearmente nel tempo. Non solo si sposta linearmente, ma ruota. La forza produce un momento di rotazione intorno al baricentro. Anche la velocità di rotazione si mantiene poi costante.



p.17 libro

Le forze applicate alle masse dei segmenti anatomici determinano in generale non spostamenti, ma accelerazioni. Gli spostamenti sono il risultato di una doppia integrazione temporale delle accelerazioni.



Due tipi di muscoli: possono solo contrarsi quindi è necessario che ci sia un muscolo che tira (forza positiva) e un muscolo che tira anche lui ma dalla parte opposta (forza negativa).

Devono essere attivati in modo coordinato → sistema estremamente sofisticato.

L'azione di frenata può essere svolta anche, per esempio, da una resistenza esterna (oltre che dal muscolo antagonista), come per esempio la forza di gravità → freno il movimento riducendo la forza

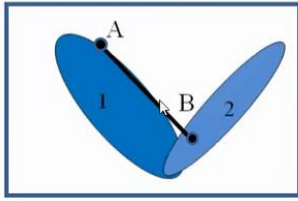
applicata dal muscolo senza la necessità dell'attivazione del muscolo antagonista.

Approfondimenti (p. 26 libro)

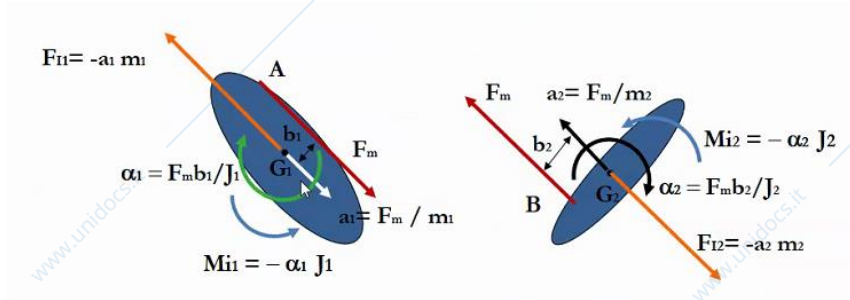
I principi dell'equilibrio statico e dinamico applicati al corpo umano

- Il corpo umano è costituito da segmenti anatomici dotati di massa e connessi da articolazioni
- Se il corpo umano è immerso nel campo gravitazionale terrestre ciascuna sua molecola è sottoposta ad una forza diretta verso il centro della terra.
- Una forza applicata ad un corpo, in assenza di una forza che la contrasti, produce un'accelerazione del baricentro del corpo di valore inversamente proporzionale alla sua massa (secondo principio della dinamica)
- Quando la forza applicata si annulla la massa conserva la velocità raggiunta; per annullare tale velocità occorre applicare una forza deceleratrice per un tempo sufficiente
- Forze interne a un sistema di masse (cioè forze di interazione tra le masse) non sono in grado di spostare il baricentro del sistema di masse; solo le forze esterne sono in grado di farlo (reazioni d'appoggio, forze gravitazionali, ecc...)
- Nel sistema articolato che rappresenta il corpo umano le articolazioni possono essere considerate come cerniere ideali (senza attrito) che permettono la rotazione relativa tra segmenti adiacenti.

Ipotesi: equilibrio statico, 1 muscolo (linea A-B) modifica istantaneamente la forza di contrazione.



In assenza di articolazione (p. 28 libro)



I segmenti A e B subirebbero:

- una accelerazione istantanea lineare inversamente proporzionale alla loro massa (m),
- una accelerazione angolare proporzionale al momento della forza muscolare rispetto al baricentro ed inversamente proporzionale al momento d'inerzia baricentrale (J)

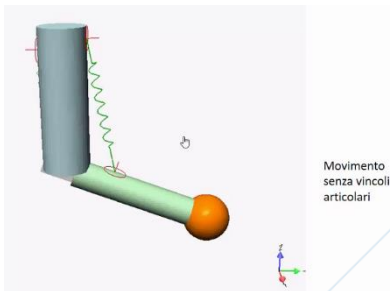
F_m non è applicata al baricentro \rightarrow genera a_1 .

Per far sì che il principio di conservazione sia soddisfatto dobbiamo ipotizzare che ci sia una forza d'inerzia F_{i1} con segno opposto a quella dell'accelerazione a_1 . La forza d'inerzia non ci sarebbe se non ci fosse l'accelerazione. F_m e F_{i1} sono una coppia di forze \rightarrow generano un momento. Questo momento produce una accelerazione rotazionale α_1 , che è data dal momento $F_m b_1$ diviso il momento d'inerzia J_1 . A quest'ultima corrisponde un momento (M_{i1}) che si oppone all'accelerazione rotazionale.

Momento d'inerzia del corpo (proprietà del corpo data dalla sua distribuzione di massa) \rightarrow momento d'inerzia di massa (J_1).

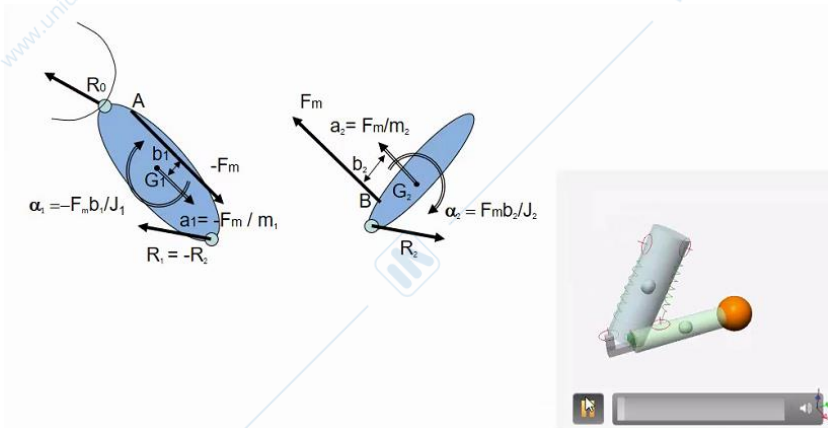
Momento d'inerzia di rotazione (M_{i1}) \rightarrow momento che si oppone all'accelerazione angolare.

Il componente di massa minore a parità di forza applicata subirà delle accelerazioni maggiori rispetto al componente di massa maggiore.



Cosa succede se non c'è forza di gravità, ma non c'è nemmeno il vincolo articolare.

La struttura non mantiene la configurazione di partenza e crolla.



C'è una cerniera che tiene legati i due componenti. Abbiamo anche altre forze rispetto a prima → reazioni interne alle articolazioni. Siamo sempre in assenza di forza di gravità. Segmento grosso si muove un po' meno, mentre quello piccolo si muove di più. È possibile osservare qualitativamente che il baricentro di questo sistema rimane fisso. Per risolvere la cinematica del sistema dobbiamo

ipotizzare che esso non sia galleggiante nell'aria ma che sia collegato ad altri segmenti anatomici (per es. spalla). Le coordinate del punto della spalla devono essere considerate note.

In presenza di articolazione (p. 29 libro)

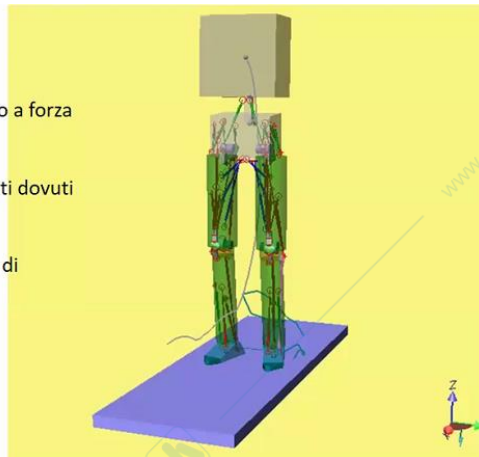
La forza di interazione tra i segmenti anatomici varia in accordo con il principio di azione e reazione e quindi ne risulta che, la variazione di forza muscolare di un solo muscolo, rispetto a quella necessaria per mantenere l'equilibrio statico, deve comportare necessariamente, in assenza di interventi di compensazione:

- L'accelerazione (lineare e rotatoria) di tutti i segmenti corporei → perché questi si trasferiscono le forze di reazioni vincolari;
- Quanto detto nel punto precedente porta alla conseguente variazione di configurazione geometrica del corpo;

Esempio

Nel soggetto che sta in piedi sottoposto a forza di gravità:

- la conseguente variazione dei momenti dovuti alle forze gravitazionali rispetto alle articolazioni;
- la conseguente variazione delle forze di reazione al terreno;
- il collasso del corpo a terra.



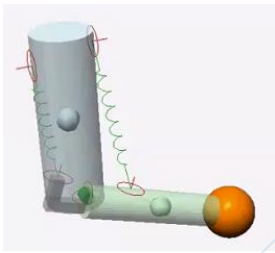
In assenza di azione muscolare, appena si esce da configurazione di equilibrio delle forze, tutto il resto casca a terra perché non ci sono azioni interne in grado di compensare questa tendenza alla caduta.

Di fatto: funzionano i muscoli fissatori e antigravitari (p. 30 libro)

- L'azione del muscolo che produce il movimento è accompagnata da variazioni di forze muscolari nei muscoli che agiscono su articolazioni prossimali rispetto al segmento in movimento (muscoli fissatori). Questi muscoli sono quelli più prossimali. In assenza di questo si andrebbe incontro a caduta del modello.
- Cambiamenti di assetto posturale conseguenti al movimento e comportanti rischio di collasso al terreno, vengono compensati da variazioni di forze nei muscoli che impediscono tale cedimento

(muscoli antigravitari → per gli arti inferiori sono muscoli estensori, per gli arti superiori sono i flessori).

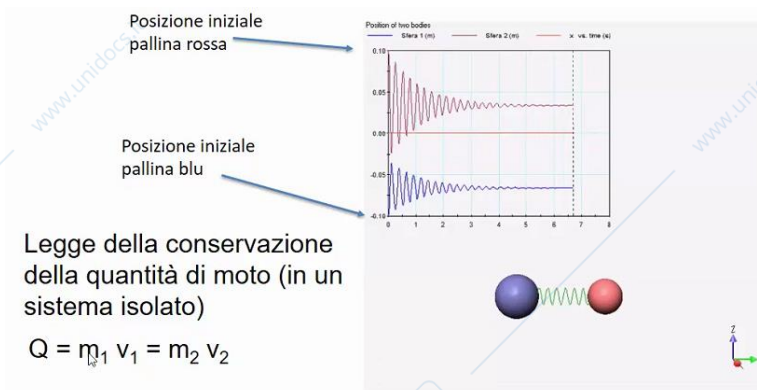
Quindi l'effetto di una contrazione muscolare dipende dalle altre forze in gioco, interne ed esterne



In assenza di forze esterne (gravitazionali per esempio...): il movimento risultante dipende dalle forze interne: forze articolari e forze muscolari (in assenza di forze esterne il baricentro è fisso).

Caso ancora lontano da quello reale. Mancano le connessioni con parti del corpo prossimali (spalla). Manca ancora la forza di gravità.

Inoltre, dipende dalle masse... (accoppiamento dinamico) (p. 18 libro)

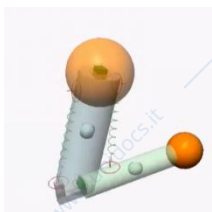


Unica forza agente dipende dalla molla che attrae una pallina verso l'altra (forza interna). Stiamo ancora analizzando caso in assenza di forze esterne.

Le masse più piccole si spostano di più (più velocemente) rispetto alle masse grosse.

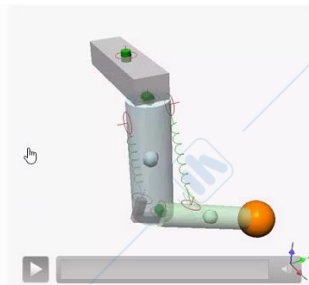
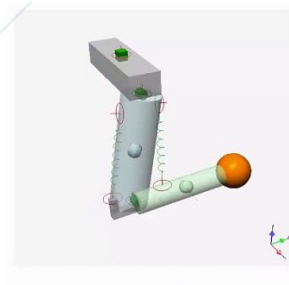
La molla non è una molla ideale, ma contiene anche uno smorzatore viscoso (dissipa dell'energia) → movimento oscillatorio smorzato fino a che non si raggiunge una configurazione di equilibrio.

Effetto delle masse (in assenza di vincoli esterni e di forze di gravità)



In assenza di vincoli esterni e di forze di gravità il movimento risultante dipende dalle masse e da come sono distribuite.

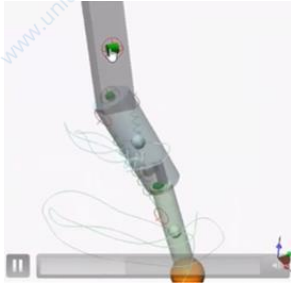
Abbiamo aggiunto una massa in corrispondenza della parte prossimale dell'arto e in questo modo abbiamo fatto sì che il segmento più grosso si muova meno di quello più sottile.



Il movimento risultante dipende dai vincoli.

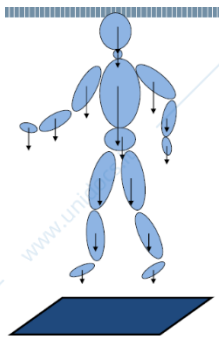
Osso scapolare fissato e osso scapolare libero di ruotare rispetto ad un'asse principale → ottengo due movimenti differenti. Il risultato di una variazione di forza muscolare non è facilmente prevedibile ma dipende anche da altre condizioni al contorno → dipende da forza di gravità, posizione delle masse, forze esterne applicate e

vincoli articolari.



Questo è ciò che accade in assenza di forza di gravità e senza alcuni vincoli.

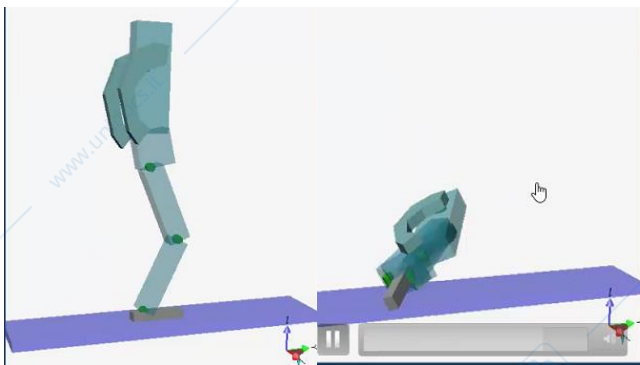
Riassumendo: supponendo condizioni cinematiche iniziali caratterizzate da velocità nulle (p. 27 libro)



1. in assenza di forze muscolari e di contatti con il terreno tutti i segmenti corporei accelererebbero verso il centro della terra mantenendo la configurazione geometrica iniziale.
2. in presenza di terreno si svilupperebbero forze di contatto in grado di impedire il movimento verso il basso dei segmenti anatomici a contatto col terreno. I segmenti più in alto ruoterebbero attorno alle articolazioni dei segmenti inferiori ed il corpo collasserebbe al suolo;
3. in presenza oltre che del terreno anche di forze muscolari in grado di produrre momenti alle articolazioni che equilibrino i momenti generati dalle forze gravitazionali e dalle forze di contatto con il terreno il corpo rimarrebbe nella configurazione iniziale.

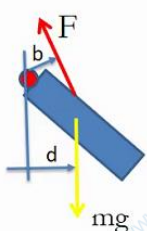
Corpo umano considerato come insieme di tanti segmenti anatomici sottoposti a forza di gravità. Ciascun segmento ha una forza verso il centro della terra che è proporzionale alla propria massa. Siccome l'accelerazione che subisce è inversamente proporzionale alla massa, tutti i corpi subiranno la stessa accelerazione → stessa velocità, stessi spostamenti. La loro posizione relativa non cambia quindi. Quando al contatto si frena i segmenti anatomici che vengono a contatto con il terreno si fermano, e tutti gli altri continuano a scendere. A questo punto si ha il collasso dell'intero sistema se non ci sono forze interne alle articolazioni.

Il "monopode": collasso a terra



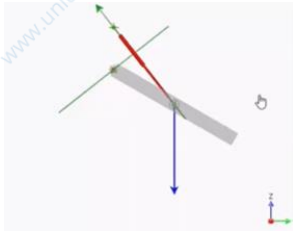
Come possiamo far stare in piedi il modello?

Produrre l'esatto valore di momento richiesto.



$$F = mg \, d/b$$

Consideriamo il seguente modellino. Corpo rigido, segmento anatomico dotato di una certa massa, incernierato in un certo punto, sottoposto a forza di gravità applicata nel baricentro e con una forza muscolare rappresentata da vettore rosso che tende a sostenere il corpo. Dobbiamo equilibrare i momenti.



Una volta che i momenti sono equilibrati il sistema dovrebbe stare in equilibrio. Nella realtà non è sempre vero. Calcolando la forza che è in grado di equilibrare il sistema facciamo un'approssimazione. Il valore calcolato è quasi giusto, ma non è sufficiente → in tempi anche abbastanza lunghi il sistema esce dal suo stato di equilibrio. D'altra parte, per esempio approssimando per eccesso, se il valore risulta troppo elevato il sistema si muove.

Oppure...

Possiamo utilizzare un sistema che si adatta. Usare il muscolo come una molla. La forza elastica richiama verso la posizione di equilibrio.

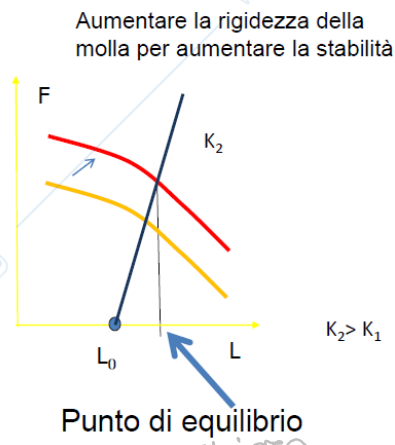
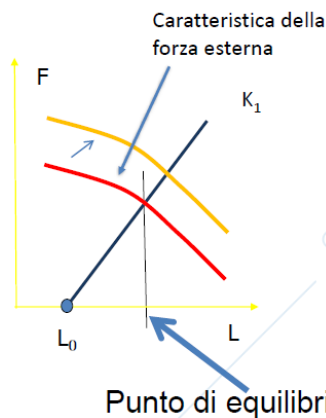
Se il segmento si sposta verso il basso il braccio b tende a diminuire e anche il braccio d . Se q_b diminuisce più di d , aumenta l'intensità del momento.

Ci vuole qualcosa che bilanci queste piccole variazioni.

Come funziona

$$F_{ext} = mg \cdot b/d$$

$$F_{int} = k \Delta L$$

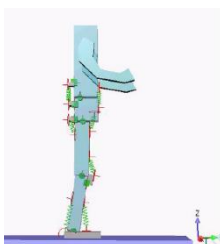


Ridotte le due forze (int e ext) allo stesso sistema di riferimento, le possiamo confrontare. La forza interna ha un andamento lineare (forza di una molla) proporzionale alla lunghezza. Mano a mano che la lunghezza della molla diminuisce (si va verso il sollevamento del carico), l'effetto della forza gravitazionale aumenta secondo l'andamento in rosso nel grafico a sinistra. Punto di equilibrio → punto in cui queste

curve si incontrano. Se aumenta la forza esterna (linea gialla, grafico a sinistra) il punto di equilibrio si sposterà in corrispondenza di una lunghezza della molla maggiore.

Se poi volessimo controllare la posizione del corpo potremmo spostare la lunghezza di riposo della molla e la rigidità (pendenza della curva).

Ora abbiamo prototipo con molle opportunamente tarate che simulano l'azione dei muscoli → ci troviamo in equilibrio. Modificando il valore di una forza, diminuendo, per esempio, l'azione di una molla → cambiano momenti e forze interne (molle interne riescono a sostenere il carico, ma quando il baricentro esce dalla base d'appoggio il sistema cade). Per la stabilità del nostro corpo servono delle azioni interne, tali da mantenere la configurazione del corpo, ma serve anche un controllo della posizione del baricentro del corpo.



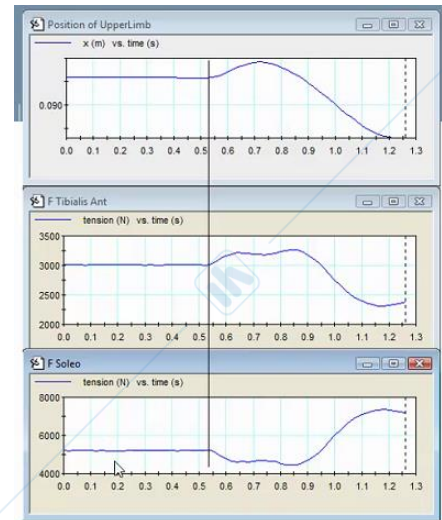
Perturbazioni possono anche essere forze interne: un'accelerazione rapida delle braccia comporta una forza d'inerzia che spinge il corpo verso l'indietro. Movimento viene compensato bene a livello dell'anca e del collo. A livello della caviglia abbiamo i muscoli tibiale anteriore e i flessori plantari (che sono quelli del polpaccio). Tra i flessori plantari il più studiato è il soleo. Muovendo le braccia il soggetto non perde l'equilibrio, ma oscilla. Le molle, quindi, subiscono delle variazioni di lunghezza (vedi grafici sotto).

Le forze si modificano come "conseguenza" della perturbazione

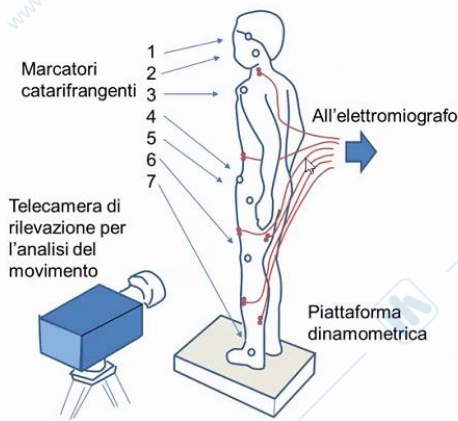
Perturbazione: movimento delle braccia

1. Curva sale → slancio in avanti
2. La molla che sta davanti che rappresenta i muscoli tibiali anteriori → all'inizio si allunga
3. La molla che sta dietro (soleo) all'inizio si accorcia.

Azioni passive che sono necessarie anche negli elementi attivi.



Esempio di sinergia posturale (p. 21-22-23 libro)

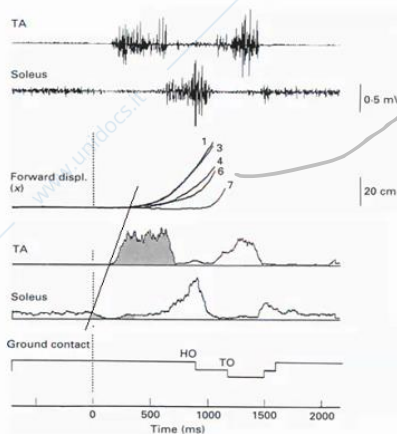


Studio della postura è molto importante.

Piastra nel pavimento (piattaforma dinamometrica): misura sia componenti verticali ma anche componenti orizzontali tramite dei sensori. Le componenti orizzontali derivano dal fatto che le masse del nostro corpo possono accelerare anche avanti e indietro generando delle forze di inerzia.

Rilevazione del movimento con telecamera e marcatori catarifrangenti (che individuano certi punti del corpo, importanti per l'analisi).

Sistema elettromiografico: apparecchio che registra attività elettrica dei muscoli in conseguenza al movimento, mediante l'utilizzo di elettrodi.



Movimento consisteva nell'iniziare a fare un passo.

Movimento marcatori (terza curva). Dall'istante in cui viene dato il via passa un po' di tempo prima che si inizi ad avere movimento del marcatore che sta sulla testa. Sequenza di movimenti diretti in avanti che partono dalla testa e arrivano ai piedi. Passano circa 300ms prima che si osservi un primo movimento della parte alta del corpo. Nel frattempo, vediamo che i muscoli attivano molto prima la loro attività, anche se il movimento avviene in ritardo. Segnale elettromiografico del soleo: c'è una piccola oscillazione già dallo stato di equilibrio (secondo grafico).

Appena il segnale viene ricevuto dai muscoli, il soleo si rilassa completamente, mentre il tibiale anteriore (TA) si contrae.

Involuppando i due segnali elettromiografici (integrandoli temporalmente) otteniamo le curve 4 e 5. Il soleo svolge un'attività ancora prima che avvenga il movimento e si contrae intensamente in corrispondenza della spinta del piede sul pavimento. Il TA si attiva dopo un po' di tempo e dopo circa 100 ms dalla sua attivazione c'è il primo movimento.

HO: istante in cui si stacca da terra il tallone e rimane in appoggio solo la punta del piede (contrazione del soleo).

TO: distacco da terra e successiva fase di volo.

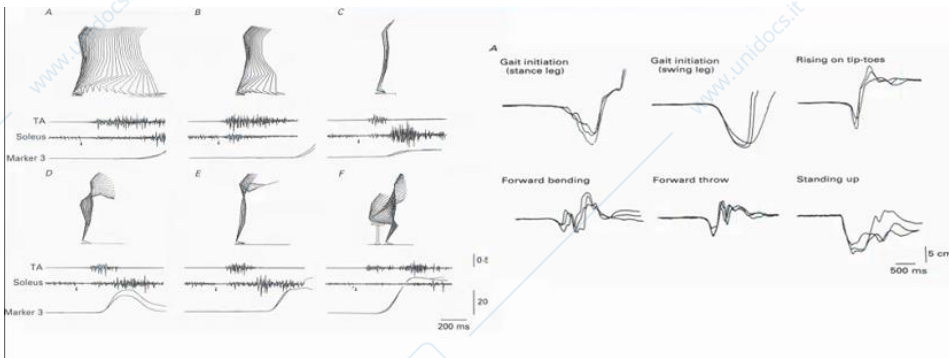
Questa sequenza di inibizioni e attivazioni del soleo e del muscolo tibiale anteriore prende il nome di sinergia posturale.

Sinergia posturale: azione coordinata di vari muscoli (in questo caso soleo e TA). In questo caso abbiamo due muscoli antagonisti che lavorano in modo sinergico.

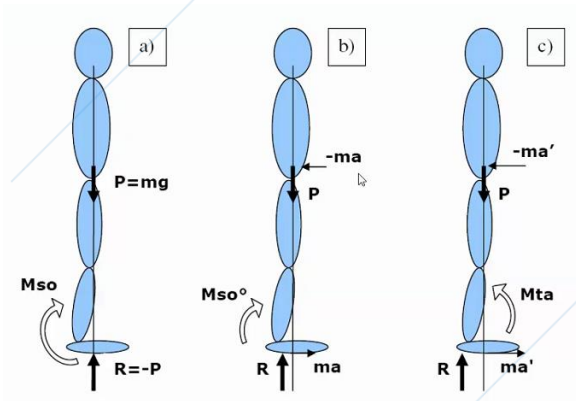
APA – anticipatory postural adjustment

Inizio cammino: contrazione e dilatazione dei due muscoli avviene in modo dilazionato nel tempo → aggiustamento posturale anticipatorio (azione posturale sinergica che anticipa il movimento). Lo scopo è quello di minimizzare la perturbazione. Il corpo viene messo in una posizione tale che nel momento in cui la perturbazione avviene siamo già pronti per contrastarla e mantenere l'equilibrio.

Forward oriented motor strategies



Sinergie di questo tipo avvengono in tutta una serie di movimenti diretti in avanti.



Spiegazione...

La forza di reazione del terreno passa più o meno a metà del piede. Questa situazione può essere mantenuta se c'è un equilibrio tra i momenti e le forze (reazione vincolare e forza peso).

Spostamento in avanti → accelerazione in avanti del baricentro.