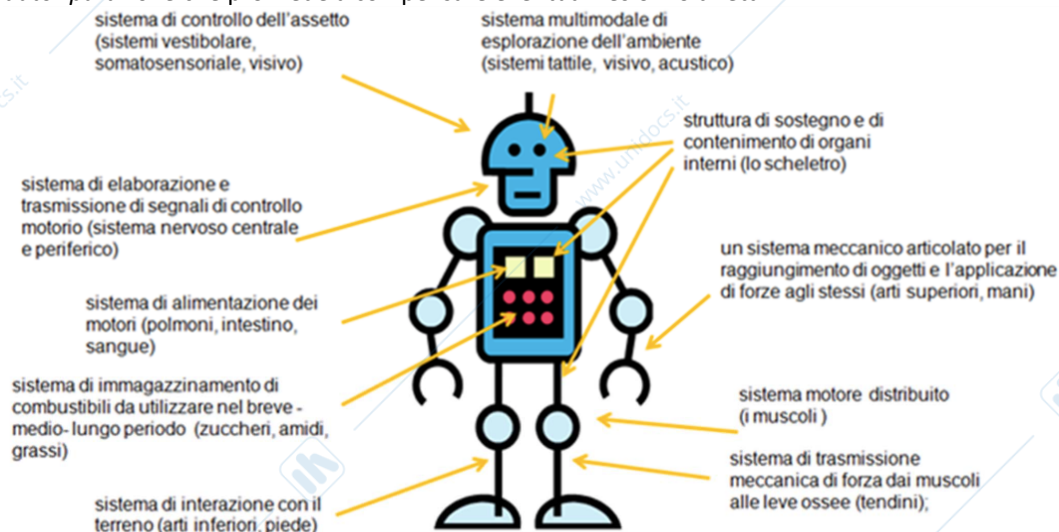


1. INTRODUZIONE ALLA BIOINGEGNERIA DEL SISTEMA MOTORIO

1. Una struttura di *sostegno*, ovvero lo scheletro;
2. Un sistema *motore distribuito*, ovvero i muscoli (agonisti, antagonisti, ...), che costituiscono un sistema distribuito perché agisce su diverse articolazioni tra loro indipendenti;
3. Un sistema di *alimentazione*, ovvero i polmoni, il sangue e l'ossigeno;
4. Un *serbatoio di combustibile*, ovvero gli zuccheri, gli amidi e i grassi;
5. Un sistema di *regolazione automatica*, ovvero le ghiandole endocrine e gli ormoni;
6. Un sistema di *trasmissione meccanica*, ovvero tendini e sistemi di leve;
7. Un sistema di *sospensione e di propulsione*, ovvero gli arti inferiori;
8. Un sistema di *retroazioni*, ovvero le afferenze sensoriali;
9. Un sistema di *controllo dell'assetto*, ovvero i sistemi vestibolare, somatosensoriale e visivo;
10. Un sistema di *protezione*, ovvero i riflessi protettivi e il sistema dolorifico.

Vi è però un elemento presente nella macchina uomo che non è presente in una macchina artificiale, ovvero un *sistema di autoriparazione* che provvede a compensare eventuali lesioni o difetti.



TERMINOLOGIA

Termini clinici	Equivalenti ingegneristico
<i>Postura</i> Assetto del corpo in una particolare situazione	<i>Posizione</i> Insieme di coordinate spaziali associate ai gradi di libertà del sistema articolato
<i>Gesto o atto motorio</i> Azione elementare finalizzata al raggiungimento di uno scopo	<i>Cambiamento di posizione nel tempo</i> Andamento temporale delle variabili cinematiche
<i>Funzione motoria</i> Capacità di compiere atti motori	<i>Capacità di azionare gli attuatori in modo coordinato</i> Presuppone la capacità di trasformare energia chimica in energia meccanica

Integrando l'aspetto clinico a quello ingegneristico otteniamo delle definizioni più complete dei concetti precedenti:

- La *postura*: ideale assetto del corpo; la *posizione* è la configurazione effettivamente assunta, in termini di relazioni geometriche tra i vari segmenti del corpo e di questi in relazione allo spazio.
- L'*atto motorio*: ideale cambiamento (o sequenza di cambiamenti) di assetto del corpo o di una sua parte; il movimento è la realizzazione fisica dell'atto motorio ed è descritta da grandezze cinematiche. Esistono atti motori caratterizzati dalla ripetizione ciclica delle sequenze di cambiamento di assetto, detti *atti motori periodici*, e atti motori transitori che non si ripetono, detti *non periodici*. Esistono poi anche altri tipi di atti motori, ad esempio *atti motori di carattere vegetativo, protettivo o di comunicazione verbale*

- La funzione motoria è l'esecuzione di molteplici atti motori contemporanei, anche di diversi tipi e che possono essere raggruppati nelle seguenti categorie:
 - ~ Locomozione;
 - ~ Cambiamenti posturali;
 - ~ Manipolazione;
 - ~ Mimica;
 - ~ Atti motori vegetativi;
 - ~ Atti motori protettivi;
 - ~ Atti motori di comunicazione verbale;
 - ~ Atti motori di esplorazione dell'ambiente.

Le parti anatomiche maggiormente coinvolte nell'azione motoria sono arti superiori ed inferiori, gabbia toracica e scatola cranica, mentre a livello organizzativo entrano in gioco occhi e testa. Svolgono però un importante ruolo anche cuore, sangue e viscere, che forniscono energia al corpo; nel movimento, quindi, non è coinvolto solo il sistema muscoloscheletrico, a cui è deputata la parte esecutiva del movimento, ma svolgono un importante ruolo anche altri organi e sistemi che si occupano della coordinazione e dell'aspetto energetico.

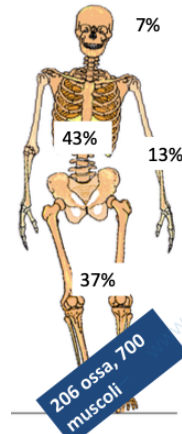
Dunque anche una lesione che non coinvolge direttamente il sistema muscoloscheletrico può avere degli effetti sul movimento ed alterarne la dinamica.

2. POSTURA E MOVIMENTO

Il sistema di sostegno corporeo è un *sistema meccanico complesso e intrinsecamente instabile*, perché è costituito da una serie di aste incernierate sul quale gravano dei carichi importanti.

È instabile perché basta una perturbazione molto piccola per allontanare la struttura dalla situazione di equilibrio, che viene però mantenuto grazie all'azione dei muscoli che vengono attivati in modo da bilanciare attraverso delle forze interne le sollecitazioni a cui è soggetta la struttura.

Grazie a questo sistema il corpo umano è in grado di raggiungere e mantenere posture anche molto complicate e fortemente instabili, che sfruttano l'allineamento tra il centro di massa e il punto di appoggio per garantire equilibrio.



Il *movimento* viene eseguito tramite un cambiamento del sistema di forze che precedentemente manteneva l'equilibrio statico del corpo o di una sua parte (primo principio della dinamica).

Il sistema di forze che agiscono sul corpo è dato dalla somma di:

- Forze *esterne*, ovvero gravità (1), inerzia (2) e forze di contatto (3);
- Forze *interne*, che sono invece principalmente le forze muscolari.

I *muscoli* o *attuatori muscolari* sono quindi in grado di modificare il sistema di forze applicato dall'esterno applicando delle forze in tempi brevi e generano la forza sotto il comando del sistema nervoso centrale. La contrazione muscolare viene a sua volta controllata da un *sistema di retroazioni e recettori*, che permette di regolare finemente gli atti motori.

I muscoli ricevono dei comandi motori adeguati a seconda del tipo di attività motoria che devono effettuare e riescono a regolare finemente la forza grazie alla presenza di un sistema di retroazioni, presente grazie a recettori di vari tipi (propriocettori, fuso muscolare, organo tendineo del Golgi).

I MUSCOLI COME LEVE: CLASSIFICAZIONE DELLE LEVE

I *muscoli* si comportano come delle *leve* che agiscono sulla struttura e permettono allo scheletro di muoversi. Le leve possono essere di tre tipi:

1. *Leve del primo genere*: il fulcro della leva è posizionato al centro della struttura mentre agli estremi vengono applicate da una parte le forze esterne e dall'altra la forza interna muscolare, che interviene ad equilibrare l'asta; questo è ad esempio il caso dei muscoli del collo e del cranio.



2. *Leve del secondo genere*: il fulcro della leva è posto ad un estremo dell'asta, la forza esterna è vicina al fulcro mentre la forza interna muscolare è più lontana dal fulcro; questo è ad esempio il caso dell'articolazione del piede in fase di sollevamento.



3. *Leve del terzo genere*: il fulcro della leva è posto ad un estremo dell'asta, la forza interna muscolare è vicina al fulcro mentre la forza esterna è più lontana dal fulcro; questo è ad esempio il caso dell'articolazione dell'arto superiore.



AZIONE MECCANICA DEI DIVERSI TIPI DI MUSCOLI

Secondo i principi della meccanica, quando il muscolo applica una forza costante, in assenza di altre forze il corpo dovrebbe sviluppare una velocità crescente in modo lineare e uno spostamento di tipo parabolico.

Per riportare il corpo in equilibrio, ovvero per mantenere la velocità costante, va invece bilanciata la forza che ne causava il movimento, tramite una forza uguale e contraria; se poi applico nuovamente una forza uguale e contraria a quella iniziale il corpo ritorna nella condizione statica iniziale.

Questo è il principio secondo cui lavorano i muscoli *agonisti ed antagonisti*: l'*agonista* inizia il movimento, mentre l'*antagonista* interviene quando il movimento va arrestato.

Ci sono poi altri tipi di muscoli che lavorano secondo il *principio della conservazione della quantità di moto*, per cui quando un corpo ancorato ad un'altra massa, il suo movimento viene maggiormente vincolato; questo è il caso dei *muscoli fissatori*.

PROGRAMMA MOTORIO

Il *programma motorio* è la pianificazione dell'atto motorio e delle risorse necessarie al suo svolgimento:

- *Muscoli*, che sono gli attuatori del movimento;
- *Circuiti nervosi*, che inviano i comandi di azione ai muscoli;
- *Sistemi sensoriali*, che forniscono informazioni ai sistemi superiori e permettono di controllare il tipo di movimento che si sta facendo;
- *Sistemi di controllo*, che integrano le informazioni ricevute e inviano i comandi.

Ci sono dei movimenti che non prevedono l'uso di retroazioni, definiti come movimenti *a circuito aperto*, perché sono movimenti *pre-programmati* svolti in modo automatico, ad esempio i movimenti balistici. La maggior parte dei movimenti fa però uso della retroazione.

Sinergie

Nell'esecuzione del programma motorio entrano in gioco non solo le retroazioni ma anche le *sinergie*, ovvero la collaborazione e la coordinazione tra diversi tipi di muscoli atti allo svolgimento di uno stesso atto motorio. Si distinguono:

- a. *Sinergie posturali*: azioni coordinate dei muscoli atti al mantenimento della corretta postura a seguito di *perturbazioni interne* (movimenti volontari di parti del corpo, ad esempio la respirazione o il movimento di articolazioni) o *esterne* (applicazione di forze esterne al corpo).
- b. *Sinergie motorie*: azioni coordinate dei muscoli per la corretta esecuzione dell'atto motorio.

L'azione sinergica dei muscoli si declina:

- In uno *sviluppo temporale*, ovvero la coordinazione della sequenza temporale di azioni muscolari
- In uno *sviluppo spaziale*, ovvero la coordinazione nella disposizione anatomica dei muscoli coinvolti.

Le sinergie si adattano alle diverse condizioni di esecuzione dell'atto motorio, modulando i propri *parametri di intensità e latenza*.

Il *riflesso* invece è una risposta involontaria ad uno stimolo, sia esso interno od esterno, che ha spesso la funzione di protezione, perché permette di effettuare un atto motorio molto veloce.

CONTROLLO MOTORIO

Per far contrarre o rilasciare i muscoli per ottenere l'atto motorio considerato:

1. Il sistema deve inviare comandi accuratamente temporizzati (*distribuzione temporale*) da diversi muscoli (*distribuzione spaziale*);
2. Il sistema di controllo deve creare le condizioni posturali per cui il movimento si possa svolgere, quindi deve attuare delle strategie di controllo posturale anticipato, dette controllo posturale anticipato (*APA*);
3. Il sistema di controllo deve tenere conto delle *caratteristiche funzionali* dei vari elementi della struttura.

Il controllo motorio viene effettuato ad opera del *sistema nervoso centrale (SNC)*. Per quanto riguarda l'organizzazione del SNC si possono distinguere *tre livelli* principali:

1. *Motoneuroni spinali*: sono il livello più basso, che utilizza le informazioni cinematiche per generare delle forze adeguate ai muscoli che vengono reclutati;
2. *Livello intermedio*: gestisce il coordinamento delle sinergie tra i diversi muscoli, agonisti ed antagonisti, ai fini di effettuare il corretto movimento;
3. *Livello corticale*: livello più alto in cui viene effettuata l'elaborazione e la decisione del tipo di movimento e vengono inviati i comandi che permettono di eseguirlo.

Sistemi a feed-back

Un comando inviato ad un sistema sarà efficace se ci sarà la possibilità di verificare l'effetto ottenuto e di modificare il comando stesso qualora il risultato sia diverso da quello desiderato; questo tipo di controllo è detto *retroazionato o feedback*.

I *sistemi retroazionati* si basano sul confronto dell'uscita reale e dell'uscita desiderata, in modo di far tendere a zero la loro differenza.

Questo tipo di meccanismo funziona sia per controllare il movimento quando non intervengono perturbazioni esterne, sia quando ci sono dei disturbi esterni, che vengono compensati dal sistema.

Il sistema a feedback *NON* è però *efficiente* nel caso in cui:

- I movimenti che vanno controllati sono movimenti molto rapidi, perché l'elaborazione delle informazioni è abbastanza lenta; questo è il caso di perturbazioni visive o uditive, che avvengono molto rapidamente.
- Le perturbazioni sono molto ampie e portano l'uscita reale ad essere molto diversa da quella ideale.

Sistemi a feed-forward

Nei casi sopra citati, in cui il sistema a feedback non funziona bene, il corpo mette in campo un sistema di controllo a *feed forward*, ovvero un'anticipazione del movimento atto a preparare il corpo a contrastare la perturbazione che sta arrivando.

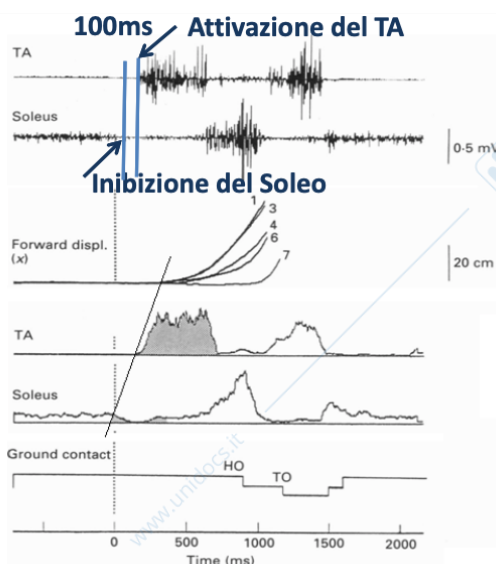
Il tipico esempio è quello della preparazione anticipata della postura prima di ricevere una pallina o un oggetto che arriva molto velocemente.

Le *strategie anticipatore* mettono il sistema in una condizione di vantaggio biomeccanico che favorisce l'esecuzione del corretto atto motorio.

APA (Aggiustamento Posturale Anticipato)

Gli APA, ovvero le strategie di controllo posturale anticipato o azione posturale anticipatoria, sono un tipo di controllo a feed-forward atto a favorire lo svolgimento dell'atto motorio desiderato attraverso la modifica della postura di un soggetto.

Consideriamo un esempio di APA:

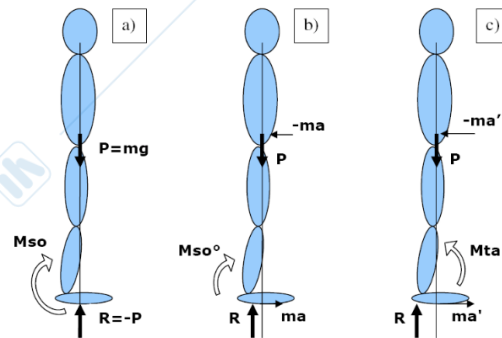


Il grafico sopra analizza l'attività dei muscoli dell'arto in appoggio durante il cammino, dal quale si nota che i muscoli antagonisti (soleo e tibiale anteriore) si attivano in modo alternato. Si osserva però che prima che il tibiale anteriore si attivi vi è un silenziamento anticipato del soleo, ovvero un'*inibizione anticipata* di circa 100 ms; questo è un tipo di azione posturale anticipatoria, perché il sistema inibisce il soleo per favorire e rendere più efficiente l'azione dell'antagonista.

Questo tipo di strategia anticipatoria non si nota solo durante il cammino, ma in moltissimi altri atti motori, ad esempio nella flessione in avanti del tronco, nel respingere una palla o nell'alzarsi dalla sedia.

Modello biomeccanico che spiega gli APA

Gli APA possono essere spiegati tramite un *modello biomeccanico* che raffigura le forze e i momenti agenti sui vari segmenti corporei e mostra come gli aggiustamenti anticipati mettono il corpo in una condizione biomeccanica favorevole al movimento che bisogna compiere.



Nel caso dell'esempio precedente del cammino, quando l'azione del soleo diminuisce il momento applicato da tale forza diminuisce, dunque anche il momento che lo equilibrava deve diminuire, riducendo il braccio della forza R. Lo spostamento di questa forza crea uno sbilanciamento che causa la creazione di una forza di attrito tra piede e terreno (ma) e a sua volta crea un nuovo momento, che viene bilanciato dall'azione del tibiale anteriore.

L'interruzione della contrazione del soleo favorisce quindi la creazione di un disassamento, che permette la formazione di una forza di attrito che favorisce l'attivazione del tibiale anteriore.

APPROFONDIMENTI DI MECCANICA DEL MOVIMENTO

Per analizzare al meglio il movimento vanno approfonditi meccanismi relativi al movimento.

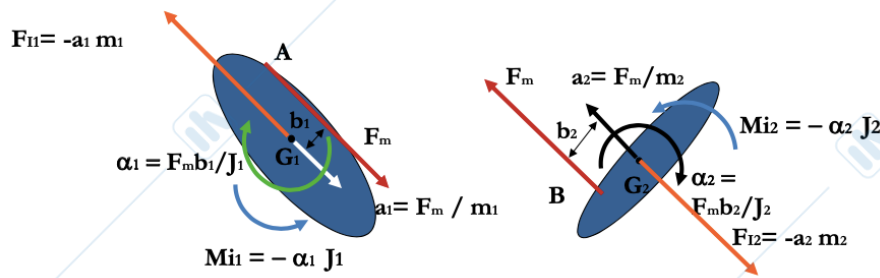
Principi di equilibrio statico e dinamico applicati all'uomo

- Il corpo umano è costituito da *segmenti anatomici* dotati di massa e connessi tra loro da articolazioni. La *massa* fa sì che su ogni segmento agisca quindi una forza peso proporzionale ad essa, che in condizioni statiche viene equilibrata da altre forze interne o esterne;
- Nel sistema articolato che rappresenta il corpo umano le articolazioni possono essere rappresentate come *cerniere ideali*, ovvero *senza attrito*, che permettono la *rotazione relativa* tra segmenti adiacenti. In questo caso ci riferiamo sempre ad angoli relativi tra i vari segmenti corporei, mai angoli assoluti, che fa invece riferimento alla posizione di un segmento anatomico rispetto ad una terna fissa esterna;
- Se il corpo umano è immerso nel campo gravitazionale terrestre ciascun segmento corporeo è soggetto ad una forza applicata nel *baricentro* del segmento considerato e proporzionale alla sua massa. Per conoscere l'equilibrio di un corpo è quindi necessario conoscere il punto di applicazione di ciascuna forza, dunque calcolare il baricentro di ogni segmento, che non è però un'operazione così banale quando si parla di corpo umano;
- Una forza applicata ad un corpo, in assenza di una forza che la contrasti, produce un'*accelerazione* della massa proporzionale alla forza (secondo principio fondamentale della dinamica). Quando la forza accelerante si annulla, la massa *conserva la velocità* raggiunta, mentre per annullare tale velocità occorre applicare una *forza deceleratrice* per un tempo sufficiente;
- Forze interne* ad un sistema di masse, cioè le forze di interazione tra le masse, non sono in grado di spostare il baricentro di un sistema, ma solo le *forze esterne* sono in grado di farlo, ad esempio reazioni di appoggio, forze gravitazionali, ecc.

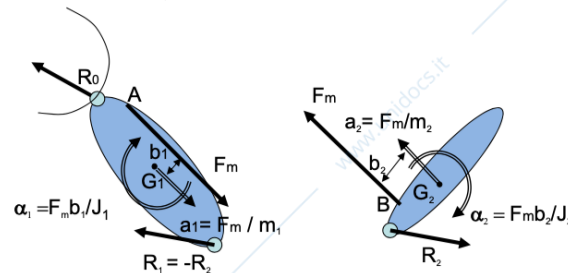
Esempio

Partendo da condizioni di equilibrio statico, un solo muscolo (linea A-B) modifichi istantaneamente la forza di contrazione. 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)



In presenza di articolazione invece, la forza di interazione tra i segmenti anatomici può variare istantaneamente in accordo con il principio di azione e reazione, e quindi il movimento risultante non è facilmente prevedibile.



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;
- la conseguente variazione di configurazione geometrica del corpo;
- 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.

MUSCOLI FISSATORI E ANTIGRAVITARI

Fondamentalmente possiamo affermare che nel corpo umano ci siano dei muscoli il cui compito è quello di regolare il movimento e il mantenimento della postura, che sono:

- Muscoli fissatori:** sono muscoli che agiscono al fine di bloccare un'articolazione, poiché l'azione del muscolo che produce il movimento è caratterizzata da variazione di forze muscolari che agiscono su determinate articolazioni prossimali rispetto al segmento in movimento;
- Muscoli antigraavitari:** muscoli che generano delle forze al fine di evitare il cedimento dovuto ai cambiamenti di assetto posturale conseguenti al movimento.

Supponendo le condizioni cinematiche iniziali caratterizzate da velocità nulle, vediamo perché l'azione dei muscoli fissatori e antigraavitari è estremamente importante:

- 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;
- 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;
- 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 nelle condizioni iniziali, dunque tali forze muscolari sono necessarie a mantenere l'equilibrio della struttura, poiché la sola reazione al terreno non è sufficiente.

SIMULAZIONE BIOMECCANICA DEL MOVIMENTO

Uno dei più grandi benefici della simulazione biomeccanica è il poter *studiare* problemi che sarebbero altrimenti difficili, costosi e/o non-etici da studiare sperimentalmente. Tramite la simulazione si può *predire* l'effetto di alterazioni neurologiche, muscolari o scheletriche sulla prestazione. I modelli usati permettono di cambiare in maniera sistematica e controllabile un solo parametro alla volta e identificare i fattori sensibili alla prestazione e al rischio d'infortunio.

