

Biomeccanica della locomozione

Una migliore comprensione del controllo motorio non può prescindere anche dall'analisi biomeccanica, ovvero dallo studio degli spostamenti dei segmenti corporei e delle forze che li rendono possibili.

La descrizione delle metodiche di misura, della loro evoluzione nel tempo e del loro raffronto con l'osservazione individuale precede l'analisi specifica dei gesti che compongono le due forme più comuni di locomozione, marcia e corsa, e l'esame delle relazioni tra meccanica ed energetica del movimento umano.

Sommario della lezione

L'analisi del movimento nei suoi vari aspetti comprende un insieme vastissimo di grandezze rilevabili, complesse strumentazioni e svariate metodologie. I moderni sistemi di analisi del movimento sono spesso costituiti da più strumenti interfacciati, ognuno con lo scopo di indagare un diverso aspetto del movimento stesso. La dotazione di alcuni laboratori comprende ad esempio speciali sistemi di videocamere, riprese video tradizionali, pedane di forza per la registrazione delle forze di reazione scambiate al terreno, elettromiografi per la registrazione dell'attività elettrica associata alla contrazione muscolare.

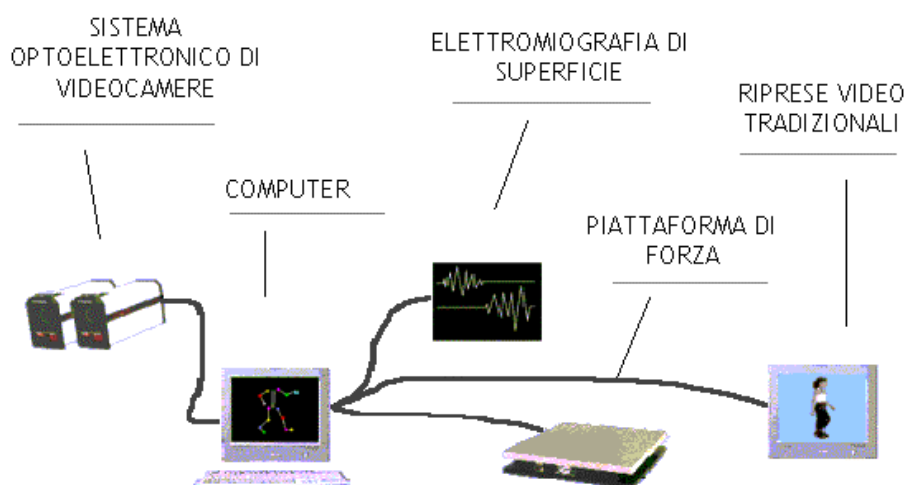


Fig. 1 - Schema di un sistema integrato per analisi del movimento

La trattazione dei principi di funzionamento e delle grandezze rilevabili da ciascuna di queste strumentazioni esula però dagli scopi del corso.

In questa lezione si cercherà quindi di dare un'idea di quello che significa analizzare il movimento senza però scendere in dettagli specifici. Tra le strumentazioni sopra citate vengono presentati brevemente i [sistemi optoelettronici](#) per l'analisi del movimento. Nella seconda parte del corso si accenna ad alcuni elementi di [analisi del cammino](#) e infine si mostrano alcuni [esempi](#) di utilizzo dei sistemi di analisi del movimento applicati al cammino.

Al termine del documento troverete le domande di [verifica](#)

La quantificazione del movimento

Ogni analisi del movimento umano deve essere preceduta da una fase di misurazione e da una fase di descrizione del movimento stesso. Descrivere il movimento implica la conoscenza di spostamenti lineari e rotazioni dei segmenti che partecipano al movimento. Molte volte si è interessati alla conoscenza di una determinata caratteristica del movimento, come l'accelerazione o gli spostamenti angolari reciproci di due segmenti. In ogni caso l'osservazione diretta del movimento può non essere sufficiente allo scopo a causa del suo carattere intrinseco di soggettività e di scarsa riproducibilità. Parallelamente all'interesse per lo studio del movimento umano sono state quindi proposte e sviluppate tecnologie per la misura del movimento stesso.

Trasduttori di spostamento

Sono dispositivi che permettono di convertire uno spostamento meccanico in un segnale elettrico che può quindi essere visualizzato su un display o registrato su un PC. Permettono misurazioni precise ma sono adatti alla misura di spostamenti lungo una sola direzione ben definita



Elettrogoniometri

Rendono possibile la rilevazione diretta delle misure angolari, cioè degli spostamenti reciproci di due segmenti corporei in corrispondenza di un articolazione. Essi sono costituiti da un sistema di aste incernierate che vengono fissate al soggetto in modo che la rotazione della cerniera sia solidale a quella dell'articolazione. Come per i sistemi precedentemente descritti, l'elettronica integrata al sistema si fa carico di trasdurre la grandezza in segnale elettrico rendendo così disponibile la misura su visualizzatore o su PC.



Trasduttori di velocità

Sono strumenti che misurano la velocità di persone o oggetti verso i quali sono puntati agendo come un radar. Vengono utilizzati per la rilevazione di velocità soprattutto in ambito sportivo



Accelerometri

Sono piccoli dispositivi costituiti solitamente da una scatolina contenendo un corpo vincolato ad una molla e un sistema in grado di misurare la forza applicata alla molla e di risalire all'accelerazione, lineare o angolare impressa all'accelerometro. Possono essere ad un solo asse o triassiali e si utilizzano applicandoli ai distretti anatomici di interesse



L'analisi del movimento attraverso immagini

I primi esempi di quantificazione complessa del movimento umano risalgono alla fine dell'ottocento. Con l'avvento della fotografia si sviluppa infatti in quegli anni la fotogrammetria analitica, che anche se condotta con mezzi per oggi rudimentali ha portato gli studiosi di quel tempo a formulare ipotesi ancora valide.

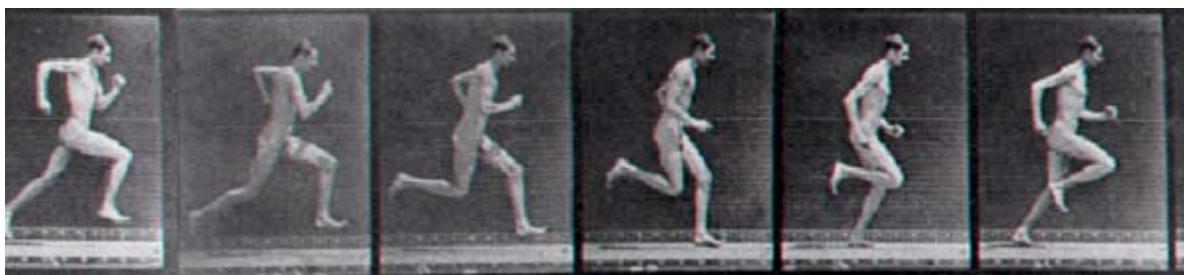


Fig. 2 - Esempio di fotografie multiple eseguite disponendo 24 fotocamere lungo il tragitto percorso dal soggetto. Sulla serie di fotografie venivano poi eseguite le misure delle posizioni dei segmenti anatomici di interesse. Muybridge, 1890 circa

La tecnologia anche in questo campo si è evoluta rapidamente e si è passati in seguito all'utilizzo della cinematografia e delle tecniche video. Diventa quindi più semplice ottenere una sequenza di immagini e questo può essere fatto ad una frequenza prestabilita, 50 immagini al secondo per le riprese televisive e la cinematografia tradizionale e da 200 a 500 fotogrammi al secondo per sistemi ad alta velocità di scorrimento della pellicola adatti quindi alla ripresa di movimenti molto veloci.



Fig. 3 - Cinepresa ad alta velocità

Per questi sistemi però la digitalizzazione delle informazioni, ossia l'estrazione dall'immagine delle coordinate, deve passare dalla fase di riconoscimento manuale da parte di un operatore dei punti anatomici o dei contrassegni presenti sulla scena.

Sistemi optoelettronici per l'analisi del movimento

Nei primi anni '80 cominciano a svilupparsi i sistemi per analisi del movimento basati su speciali videocamere a infrarossi e marker riflettenti.

I marker, di forma sferica o semisferica vengono posti sul soggetto in esame e l'infrarosso riflesso da questi viene visto dalle telecamere come un punto luminoso sulla scena.



Fig. 4 - I marker vengono solitamente applicati al soggetto in punti che coincidano con articolazioni o parti terminali dei segmenti

Il sistema, che deve essere composto da un numero minimo di due telecamere, è in grado, attraverso algoritmi matematici e procedure di stereofotogrammetria di combinare le immagini bidimensionali provenienti da ogni telecamera ed elaborare un'immagine tridimensionale.

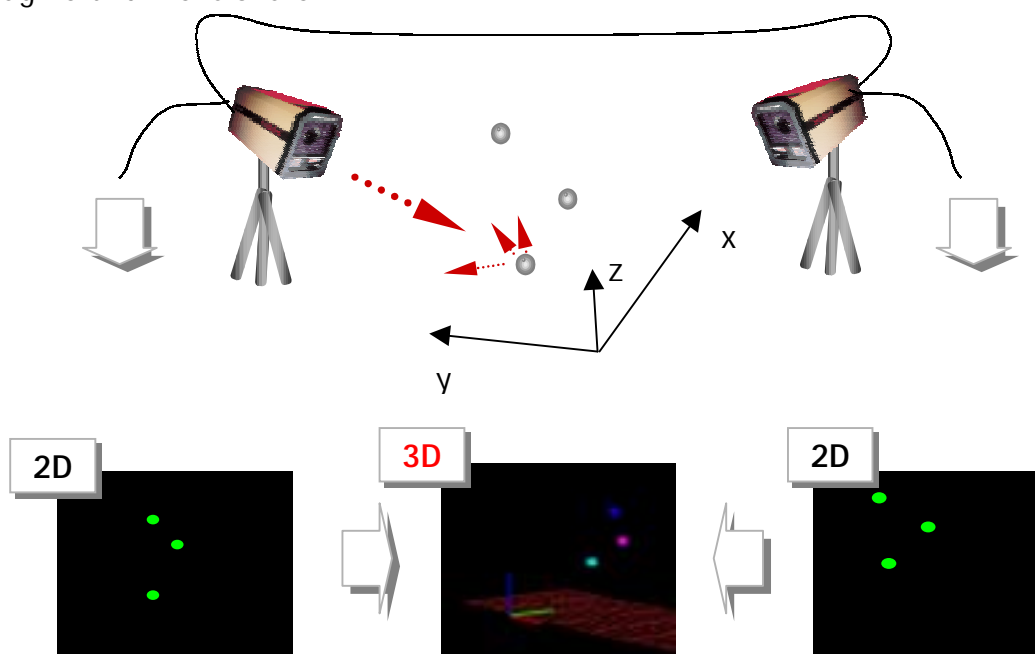


Fig. 5 - Sistemi optoelettronici per l'analisi del movimento. Ogni telecamera registra un'immagine bidimensionale dei marker riflettenti presenti sulla scena. Per i marker che vengono visti contemporaneamente da almeno due telecamere è possibile ricostruire l'immagine tridimensionale.

Per ottenere le elevate prestazioni di accuratezza e velocità necessarie per l'analisi di movimenti rapidi la maggior parte dei sistemi attuali permettono alte frequenze di acquisizione, tipicamente attorno alle 100 immagini al secondo ma che possono arrivare anche a 500 o 1000 immagini al secondo. Tali sistemi sono quindi in grado di restituire le coordinate x, y, z , in mm per ogni marker presente sulla scena per tutta la durata dell'acquisizione con una precisione che può variare da qualche centimetro per grandi campi visivi a 1mm per campi ristretti. Le informazioni che si ottengono quindi per mezzo di tali sistemi di analisi del movimento sono la descrizione della variazione della posizione di zone segnate dagli appositi marker. Dalle misure di spostamento è possibile ricavare in maniera relativamente semplice delle grandezze derivate, come velocità e accelerazioni e anche dei parametri più complessi, come range di movimento, angoli, spostamenti reciproci di segmenti

L'analisi del cammino

Durante la camminata, che ha come ovvio scopo quello di permettere lo spostamento del soggetto, le principali funzioni svolte dall'apparato locomotore sono

- Generazione di una forza propulsiva
- Mantenimento della stabilità a livello superiore nonostante il continuo cambiamento della situazione posturale
- Assorbimento dello shock dovuto all'impatto con il terreno ad ogni passo
- Conservazione dell'energia durante le funzioni precedenti al fine di minimizzare lo sforzo da parte dei muscoli

Nello studio della cinematica e della biomeccanica della locomozione umana ci si riferisce sempre al ciclo del cammino. Si definisce ciclo del cammino (gait cycle), il periodo che intercorre tra due appoggi successivi dello steso arto al terreno. Si suddivide quindi tale intervallo in due fasi distinte.

- **fase di stance**, o fase di appoggio, durante la quale il piede rimane a contatto con il terreno. Nella normale deambulazione occupa circa il 60 % del ciclo del passo, si accorcia sensibilmente con la corsa, riducendosi fino al 37% nella corsa veloce.
- **fase di swing**, o fase di trasferimento. L'arto viene portato avanti per prepararsi all'appoggio successivo.

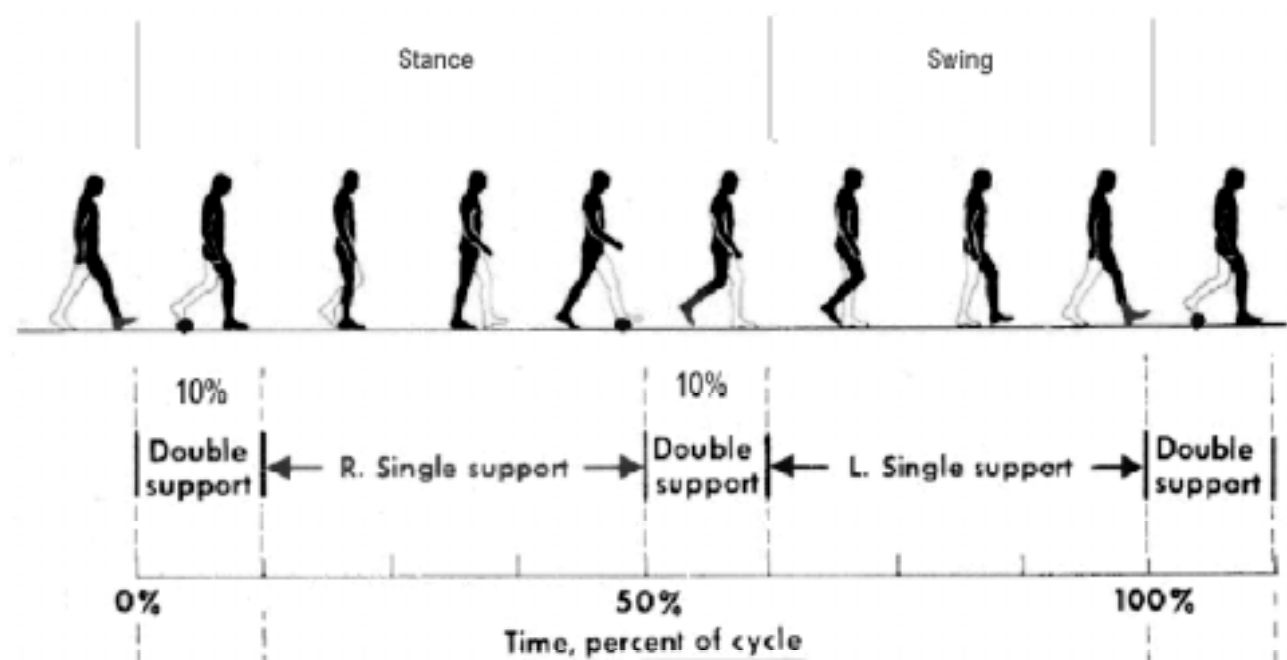


Fig. 6 - Schema della suddivisione delle fasi del passo

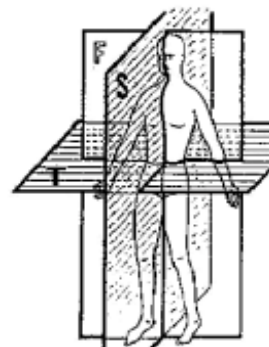
Queste due fasi principali sono usualmente suddivise dal punto di vista funzionale in otto fasi, cinque riferite alla fase di stance e tre a quella di swing. [\(vedi approfondimento\)](#)

L'analisi del movimento, e la descrizione delle grandezze in gioco, anche per quanto riguarda la camminata, non può prescindere dall'identificazione di appropriati sistemi di riferimento.

Tradizionalmente si proiettano idealmente le posizioni, gli spostamenti e gli angoli su un sistema di piani riferiti ad una persona in posizione eretta sono, (vedi Fig. 6), **piano coronale**, **piano frontale** e **piano sagittale**.

Nel analisi del cammino le grandezze più analizzate sono quelle relative alle articolazioni di anca, ginocchio e caviglia. Rispetto ai piani di riferimento appena descritti, sul piano trasverso si vedono i movimenti di rotazione interna ed esterna, su quello frontale si hanno i movimenti di adduzione e abduzione e sul piano sagittale si vedono i movimenti di flessione estensione delle articolazioni.

Fig.7 - Piani di riferimento
F = piano frontale, divide il corpo in parte anteriore e posteriore
S = piano sagittale, divide il corpo in lato destro e sinistro
T = piano trasverso o coronale, parallelo al suolo



L'analisi cinematica del cammino con i sistemi optoelettronici

Servendosi dei sistemi di analisi del movimento precedentemente descritti è relativamente semplice eseguire delle misure degli angoli di flessione estensione. I markers devono essere posizionati su punti anatomici ben definiti, in modo tale che la linea che idealmente li congiunge e che poi sarà ricostruita matematicamente sia parallela al segmento corporeo di interesse. Attraverso dei calcoli trigonometrici si arriva quindi a ricavare l'angolo compreso tra le due rette e a stimare così l'angolo all'articolazione



Fig. 8 - Posizionamento dei marker sul soggetto

dorsale
 lombare
 anca
 ginocchio
 caviglia
 tallone
 metatarso

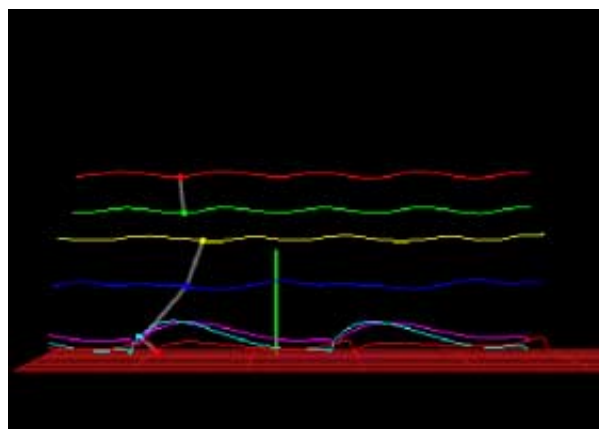


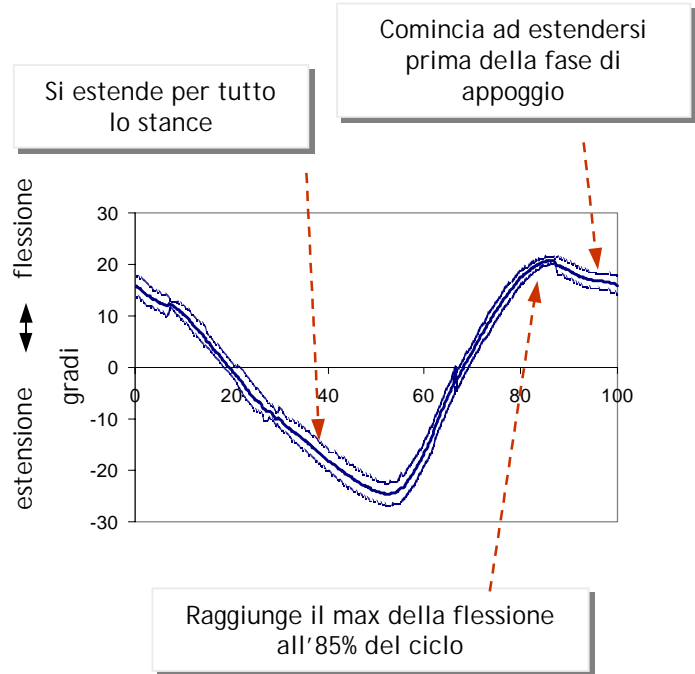
Fig. 9 - Ricostruzione tridimensionale al computer di un ciclo del passo

La maggior parte delle misure di cinematica e biomeccanica del cammino e della corsa, vengono riportati su di un grafico che ne mostra l'andamento in funzione del ciclo del passo. Solitamente inoltre anziché mostrare i valori ricavati per ogni passo si preferisce ricavare una media dei valori di vari passi e rappresentare e studiare l'andamento della curva di ciclo medio. Qui di seguito sono riportati come esempio i risultati di uno studio condotto su un soggetto normale, gli angoli di flessione estensione di anca, ginocchio e caviglia. A questo proposito si sottolinea che la convenzione adottata per l'assegnazione di un valore agli angoli è tale che gli angoli valgano zero con il soggetto in posizione eretta.

Esempio di grafici di angoli di flesso estensione delle articolazioni

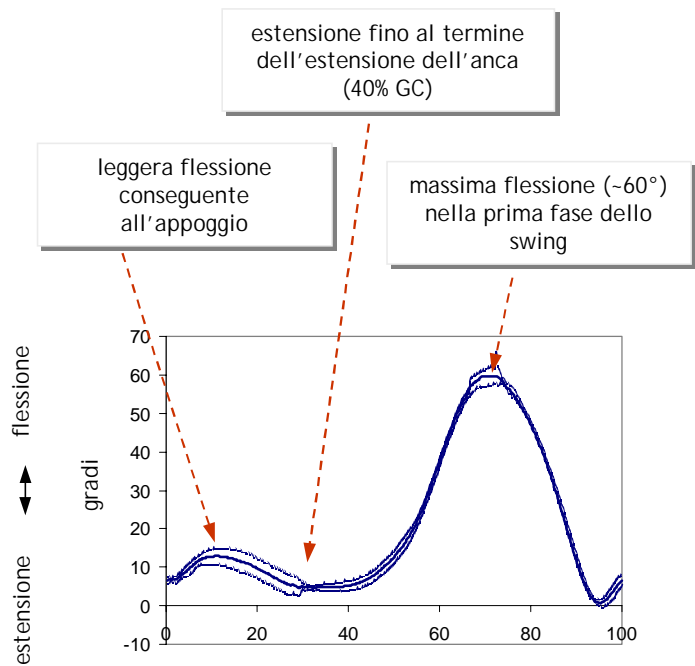
Angolo di flesso-estensione dell'anca

Si ricava come angolo tra la retta che idealmente descrive la direzione del busto e quella parallela alla direzione della coscia



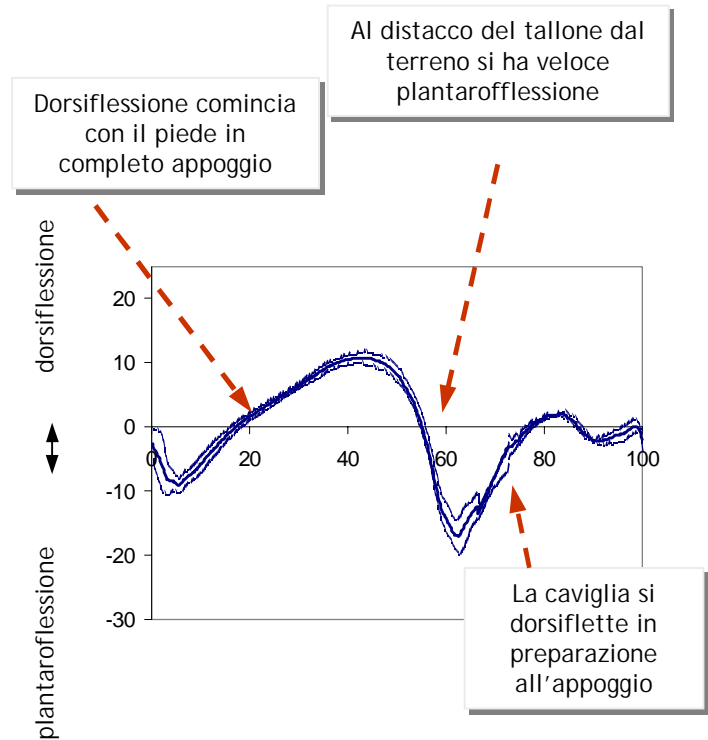
Angolo di flesso-estensione del ginocchio

Per convenzione l'angolo si assume nullo ad arto esteso, aumenta con la flessione e diminuisce con l'estensione



Angolo di flessione dorsale e flessione plantare della caviglia

La convenzione per la definizione degli angoli stabilisce che anche per la caviglia alla posizione eretta si abbia un angolo di zero gradi. Valori positivi corrisponderanno poi alla flessione dorsale e negativi alla flessione plantare



L'analisi cinematica del cammino assieme all'analisi della biomeccanica, cioè delle forze coinvolte, è un potente strumento per la comprensione dei meccanismi che stanno alla base del movimento. Per questo motivo l'analisi cinematica e biomeccanica del cammino assumono notevole importanza in molti campi, come ad esempio lo studio del controllo motorio e per le valutazioni funzionali in ambito sportivo. Inoltre tali metodologie di indagine sono largamente utilizzate in ambito clinico per la diagnosi e le valutazioni di patologie come spasticità e disturbi del coordinamento motorio.

Le fasi del passo

Per una miglior comprensione degli eventi che compongono il ciclo del passo, usualmente si effettua una suddivisione in 8 fasi

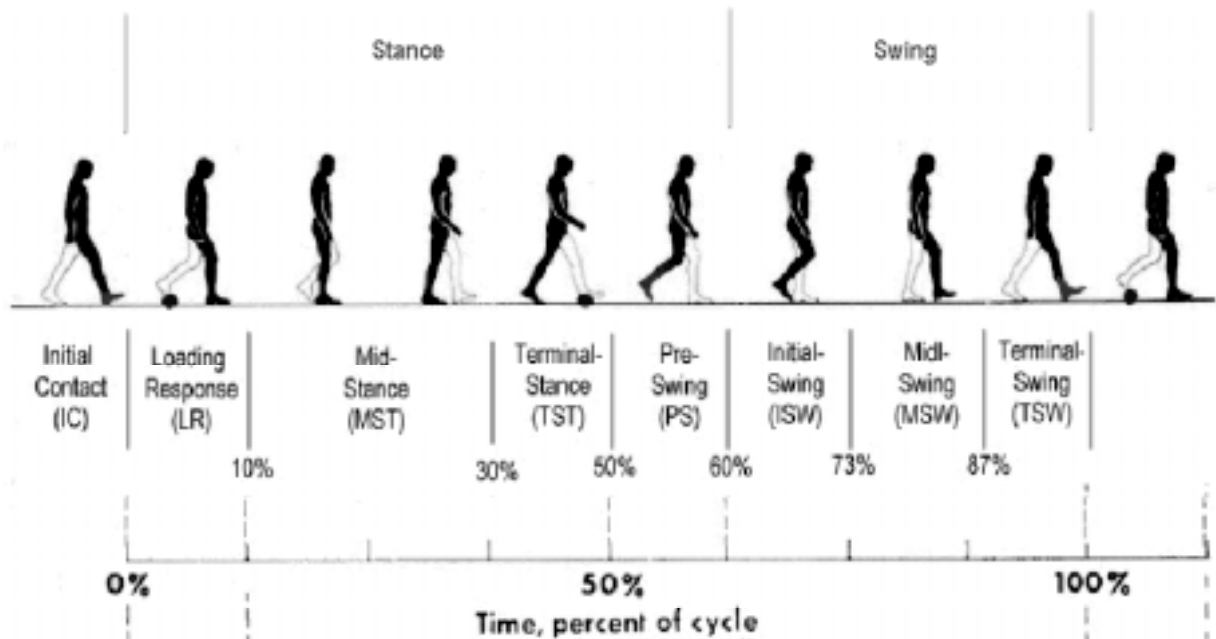


Fig. 10. Divisione funzionale del passo in 8 sottosequenze

STANCE

- 1. Initial contact.** È una fase brevissima che va dallo 0 al 2% del ciclo del passo. Il piede proiettato in avanti tocca il suolo con il tallone.
- 2. Loading response** Coinvolge circa il 10% del ciclo del passo, Il piede si appoggia per intero al terreno e la caviglia ha una leggera flessione dorsale in risposta al carico sull'arto del peso del corpo.
- 3. Mid Stance Time** Si estende dal 10% al 30% del ciclo del passo, , inizia con lo stacco del piede controlaterale (termina la fase di doppio supporto) e termina quando il piede è interamente supportato dal calcagno., dalle ossa del metatarso e dalle dita. Il ginocchio è mantenuto in estensione dalla contrazione del quadricipite, mentre la caviglia si flette per azione del tibiale anteriore.
- 4. Terminal Stance Time** Si estende dal 30% al 50% del ciclo del passo, termina quando l'arto controlaterale tocca il suolo. L'arto ha superato la verticale e il corpo comincia a cadere in avanti, il ginocchio si flette lievemente sotto il suo peso e il centro di gravità si abbassa.
- 5. Pre Swing** Si estende dal 50% al 60% del ciclo del passo. Termina con lo stacco dal terreno delle dita dell'arto di interesse. È la fase di trasferimento del peso. I muscoli posteriori della gamba entrano in contrazione e producono l'estensione della caviglia e delle articolazioni metatarsofalangee, fornendo una spinta verso l'alto e in avanti.

STANCE

- 6. Initial Swing** Si estende dal 60% al 73% del ciclo del passo. Comporta lo spostamento in avanti dell'arto inferiore di interesse subito dopo lo stacco conseguente alla flessione di anca, ginocchio e contemporanea leggera dorsiflessione del piede
- 7. Mid Swing** Si estende dal 73% al 87% del ciclo del passo; coinvolge lo spostamento dell'arto interessato da una posizione posteriore al tronco ad una anteriore. Simultaneamente la caviglia si flette per azione del tibiale anteriore e recupera l'estensione che aveva spinto il corpo in avanti alla fine dell'appoggio.
- 8. Terminal Swing** Copre l'ultimo intervallo del ciclo del passo. Si ha la continuazione del movimento progressivo dell'arto di interesse ed il completamento dell'estensione del ginocchio e della caviglia in preparazione al successivo contatto con il suolo.

Verifica

Rispondi in modo sintetico a queste domande, se hai dubbi ti consiglio di non consultare il testo nei punti specifici ma prova a rileggere tutta la lezione

1. Indica le caratteristiche principali di un sistema di analisi del movimento
2. Descrivi le fasi del cammino
3. Quali sono le articolazioni coinvolte nel cammino? Come intervengono in relazioni al ciclo del passo?
4. Descrivi in dettaglio le variazioni angolari di un'articolazione durante il ciclo del passo