



POLITECNICO
MILANO 1863

**BIOINGEGNERIA DEL SISTEMA
MOTORIO
Sezione: M-Z
Biomeccanica del movimento**

Motion analysis lab and Gait analysis



Caratteristiche dei sistemi di analisi del cammino

- rilevazione ed elaborazione automatica delle grandezze significative per la valutazione funzionale;
- precisione ed affidabilità delle misure;
- ridotto disturbo al paziente durante l'esecuzione dell'esame;
- possibilità di ripetizione delle prove e disponibilità dei risultati in tempi ristretti.

Esigenza clinica

Motion analysis lab



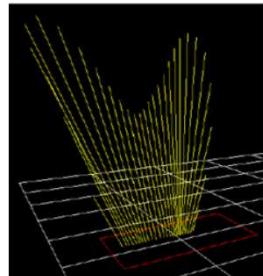
Gait Analysis: metodologia

Cinematica: **posizione**



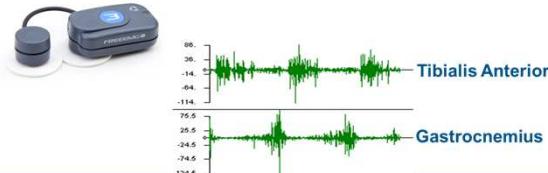
Dinamica:

Reazioni d'appoggio



Misurate ad ogni istante

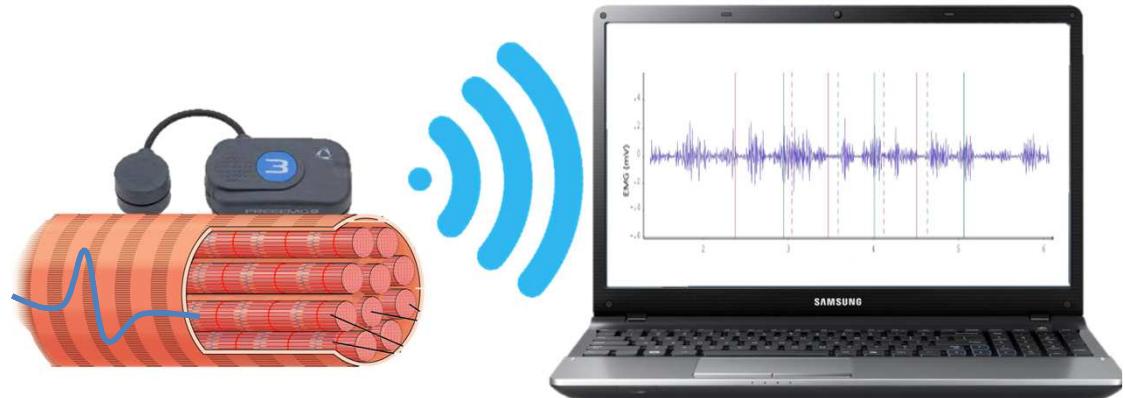
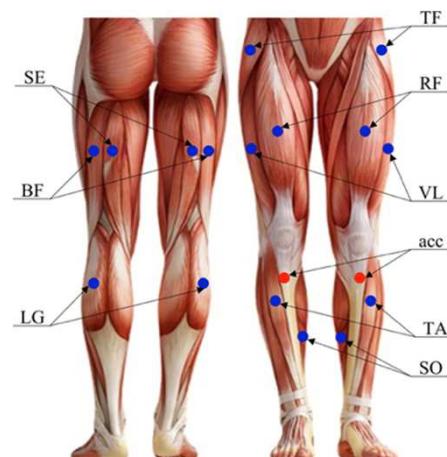
Attività muscolari



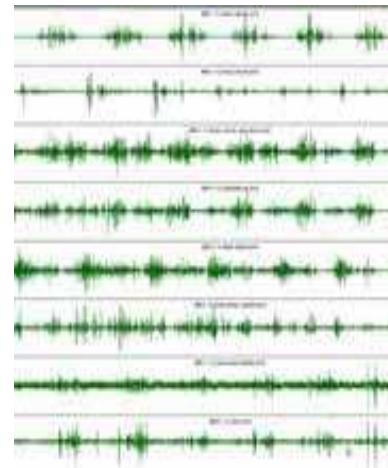
**Rilevate con EMG
di superficie**

Elettromiografia Dinamica

È una tecnica che consente di determinare la relazione tra il **segnale di attivazione muscolare (EMG)** ed il **movimento durante il ciclo del cammino**.

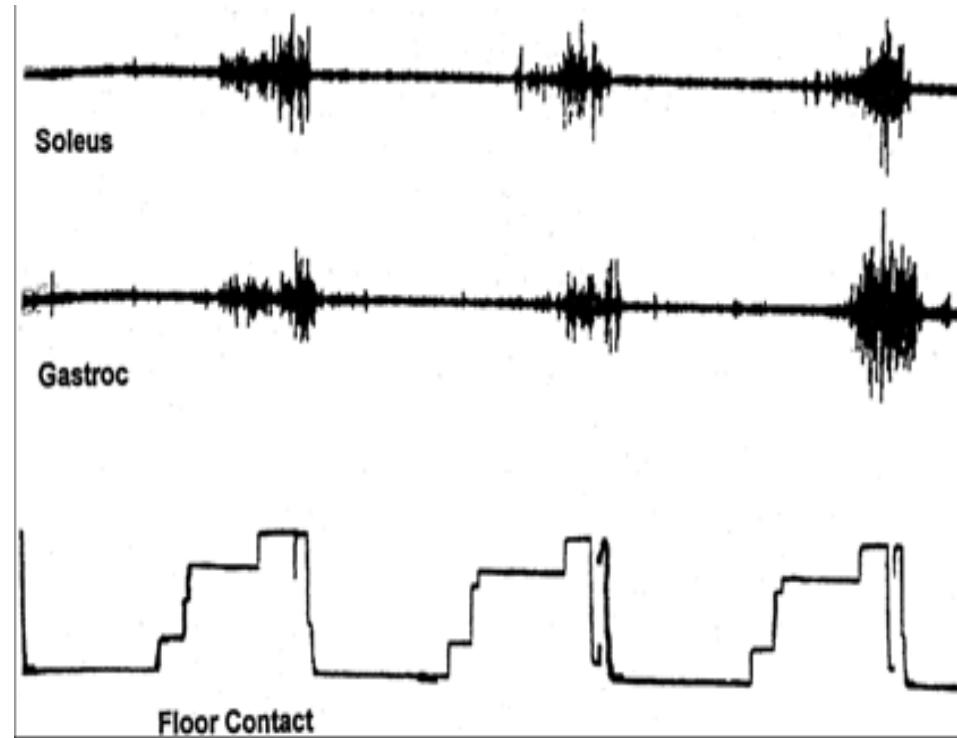


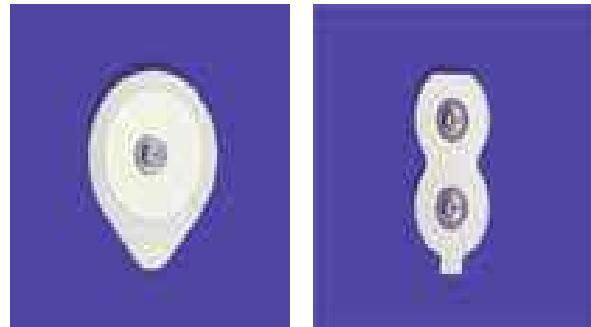




***Elettromiogramma
durante il
cammino
tricipite surale
di un bambino
sano***

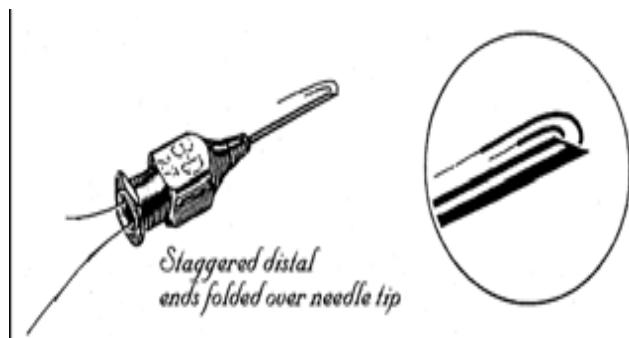
foot switch





Elettrodi di superficie

Quando interessa l'attività di tutto un gruppo muscolare (gluteo massimo, medio, quadricipite, gastrocnemio)

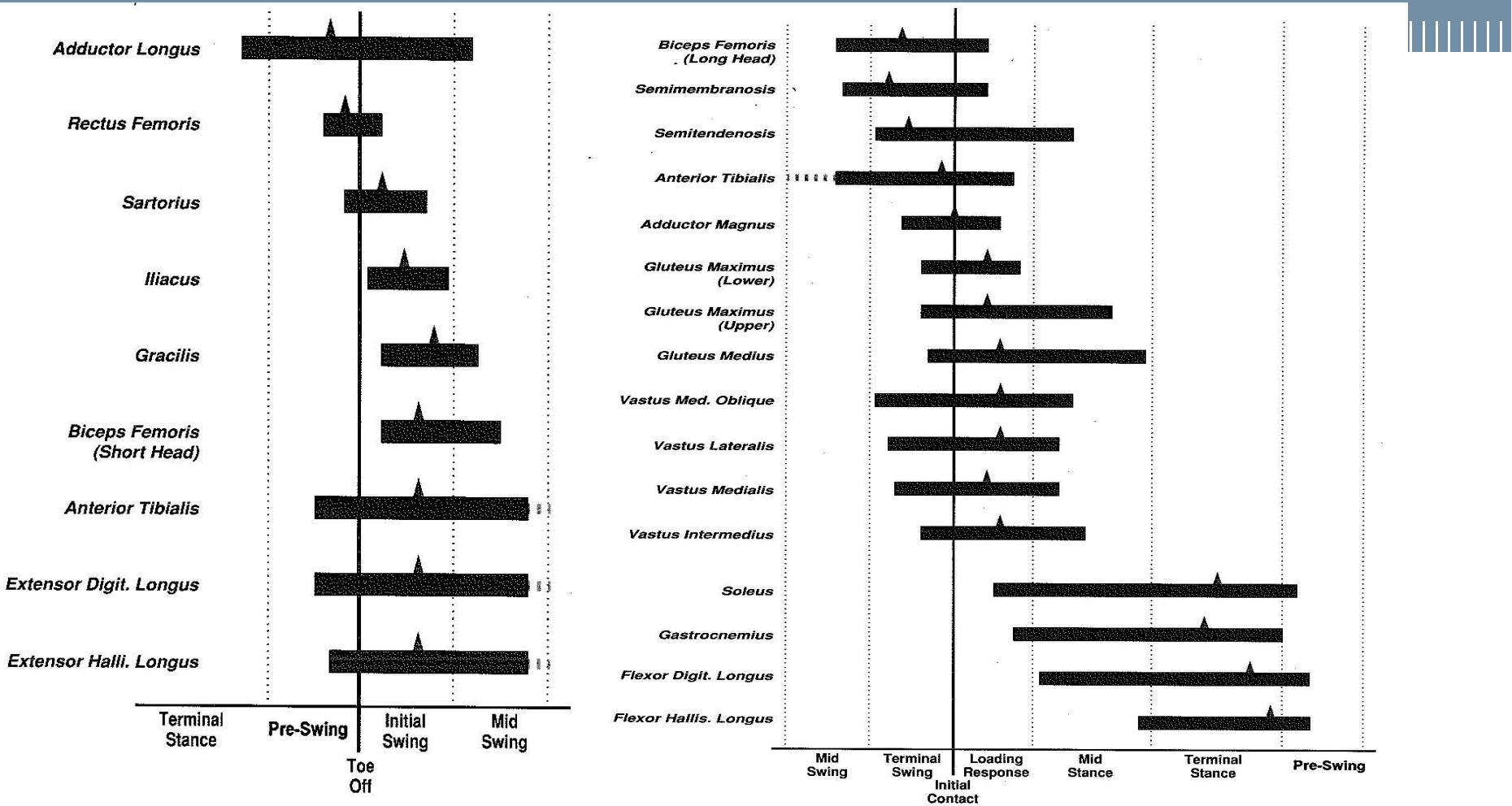


Tecnica di Basmajan)

Elettrodi a filo

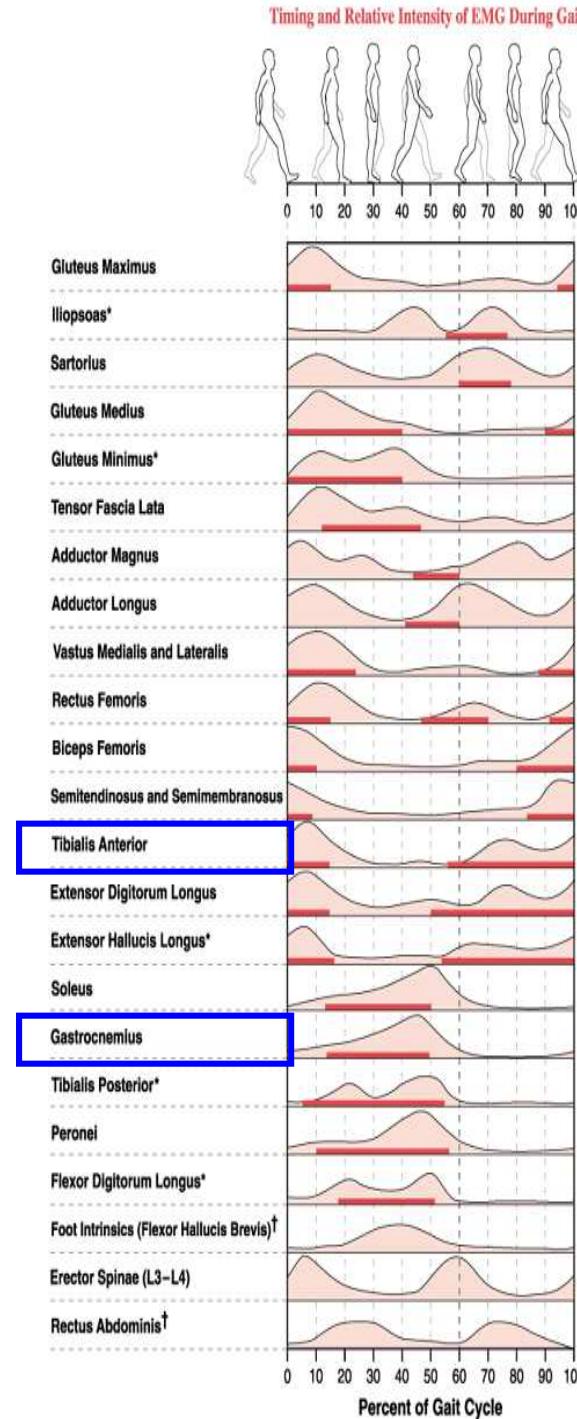
Quando si analizzano muscoli piccoli o profondi, soprattutto nell'ottica di un intervento chirurgico (ad es. trasferimento di un muscolo)

Output of EMG



“muscle phasic activity chart” di un soggetto adulto durante il cammino

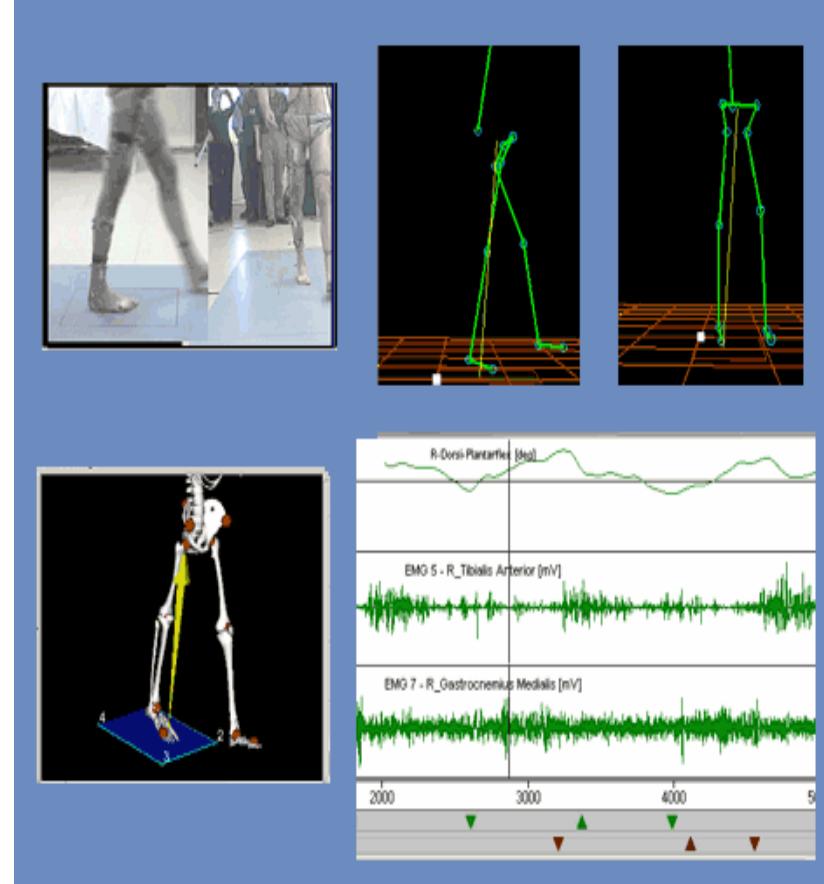
Bioingegneria del Sistema Motorio – M. Galli

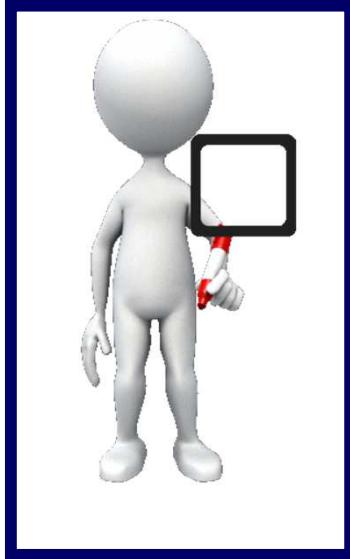


This image appears in Neumann DA: Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Physical Rehabilitation. St. Louis, Mosby, 2002.

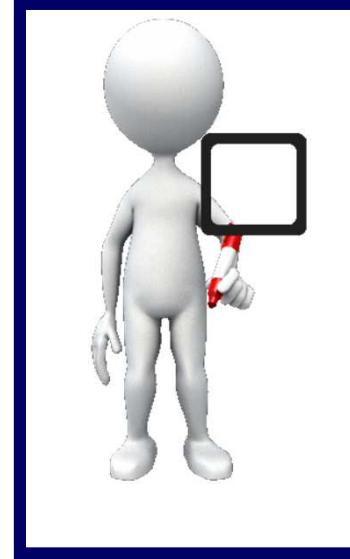
Copyright © 2002, Mosby, Inc. All rights reserved.

Analisi Multifattoriale: integrazione di diversi tipi di dati

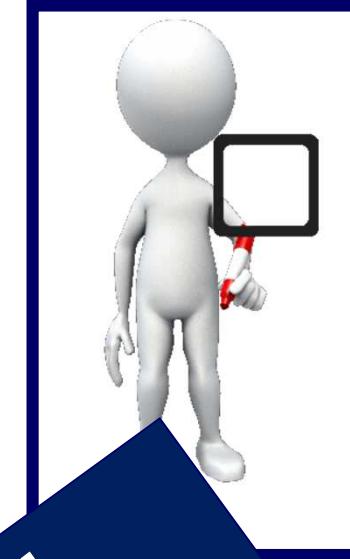




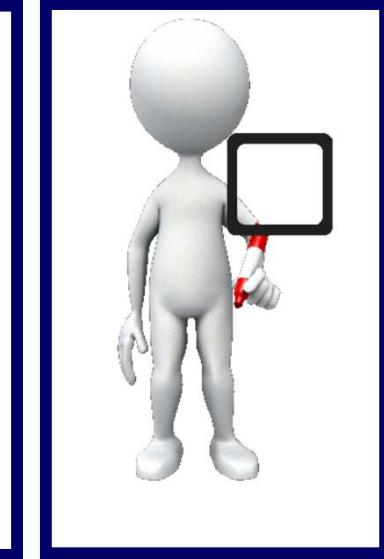
Kinematic



Kinetic

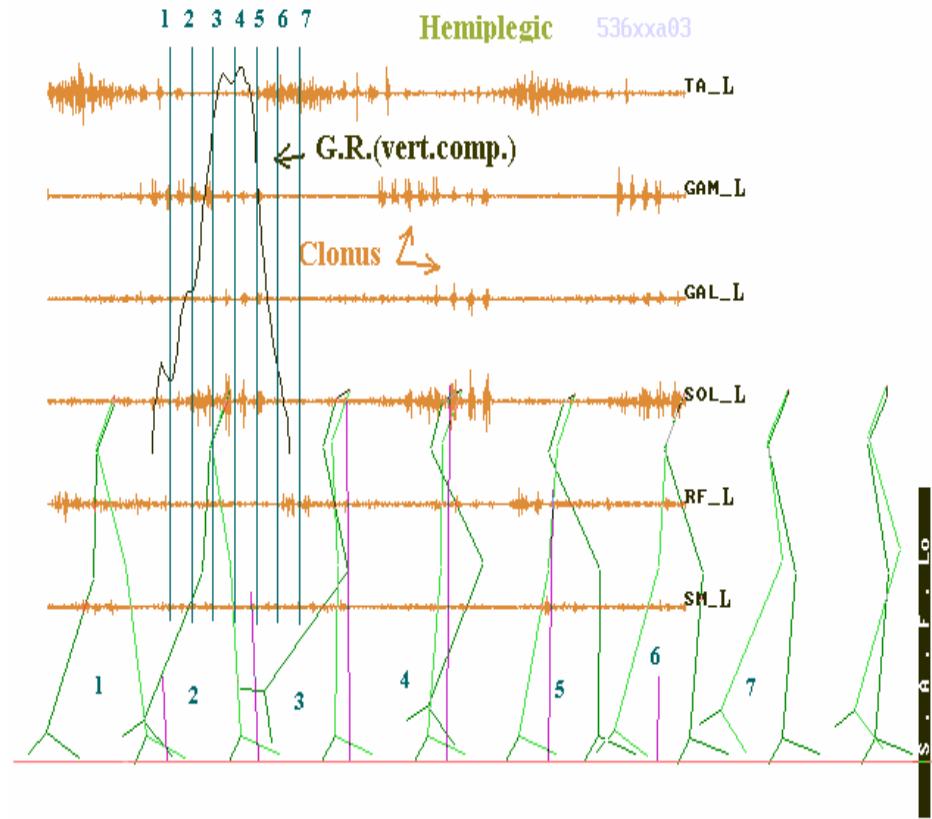


**Multifactorial
analysis**

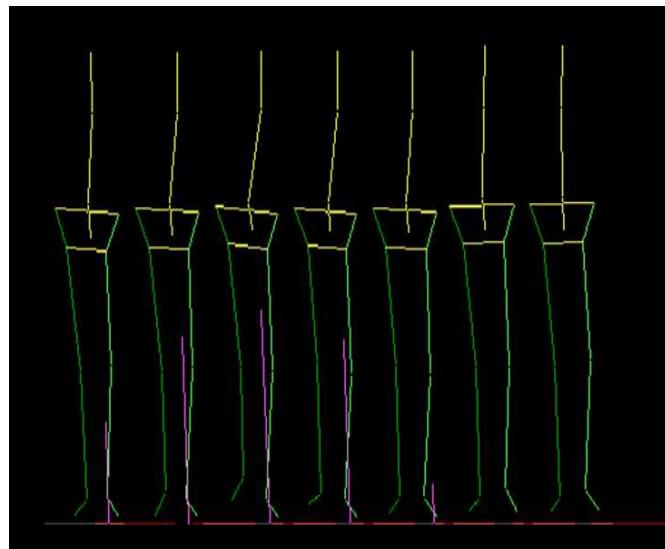
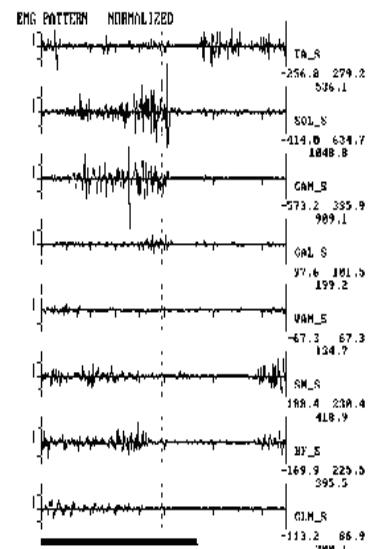
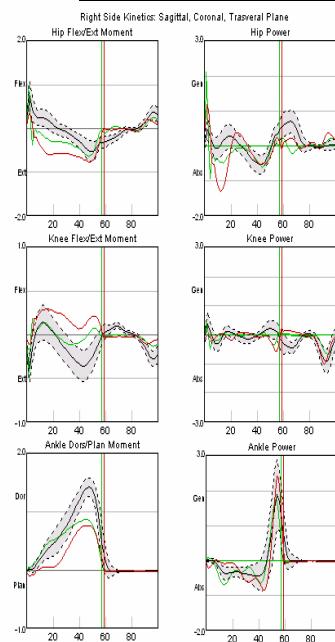
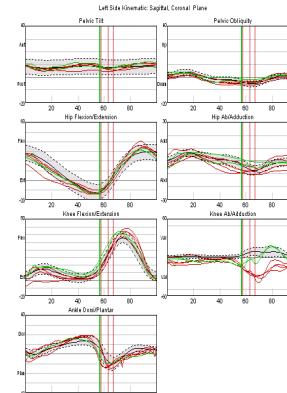
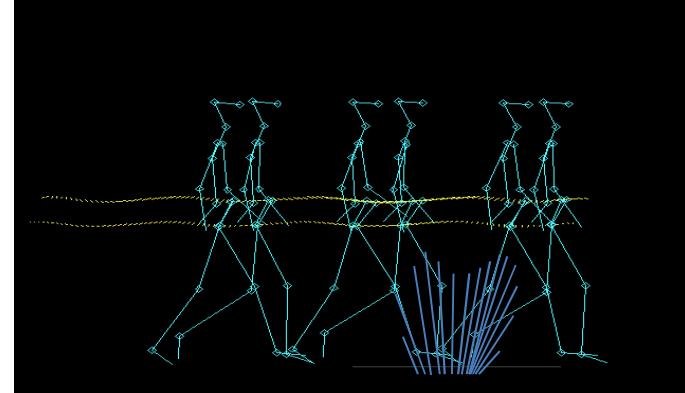


Video

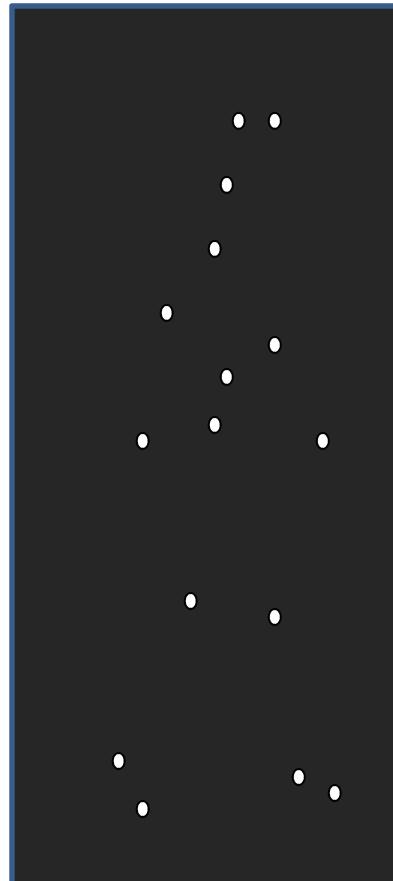
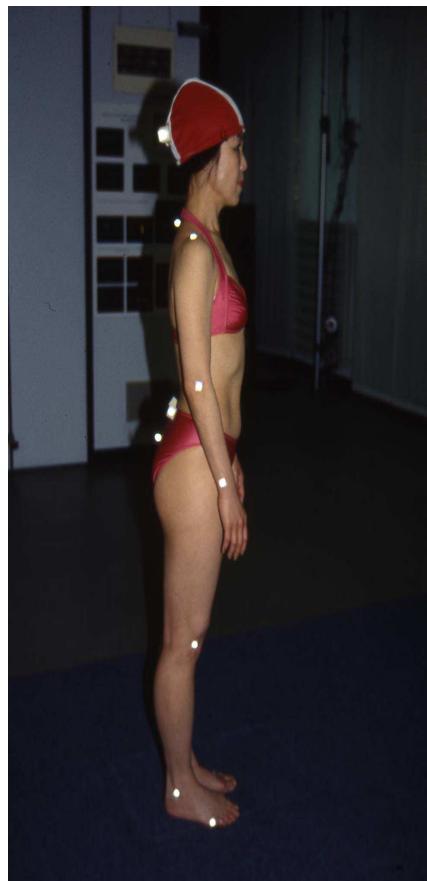
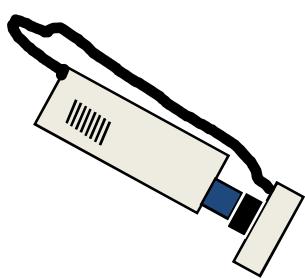


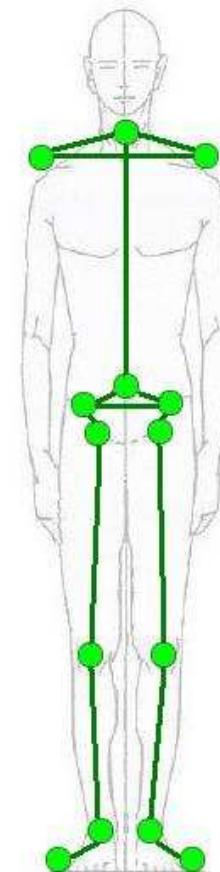
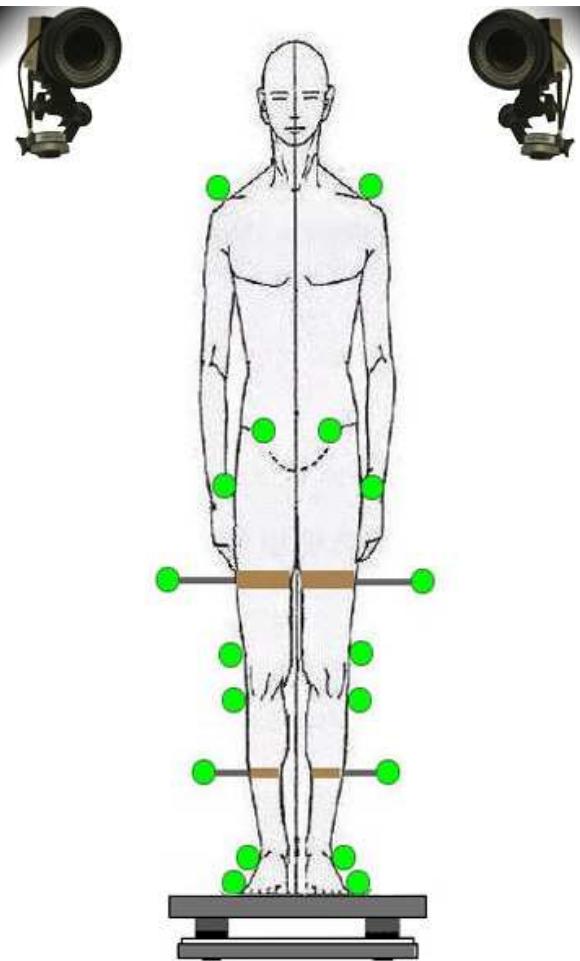
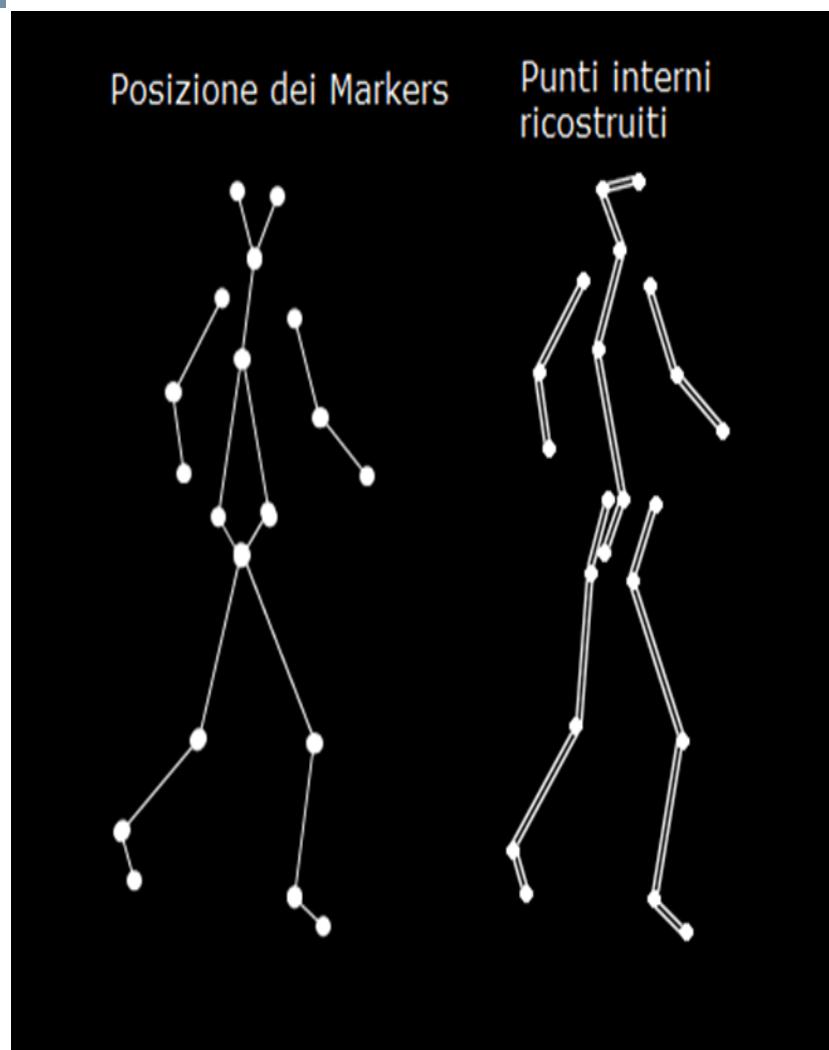


Cosa ci fornisce l'analisi del cammino



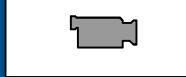
Definizione del protocollo sperimentale





Come si effettua una prova di Gait analysis

Preparazione del paziente

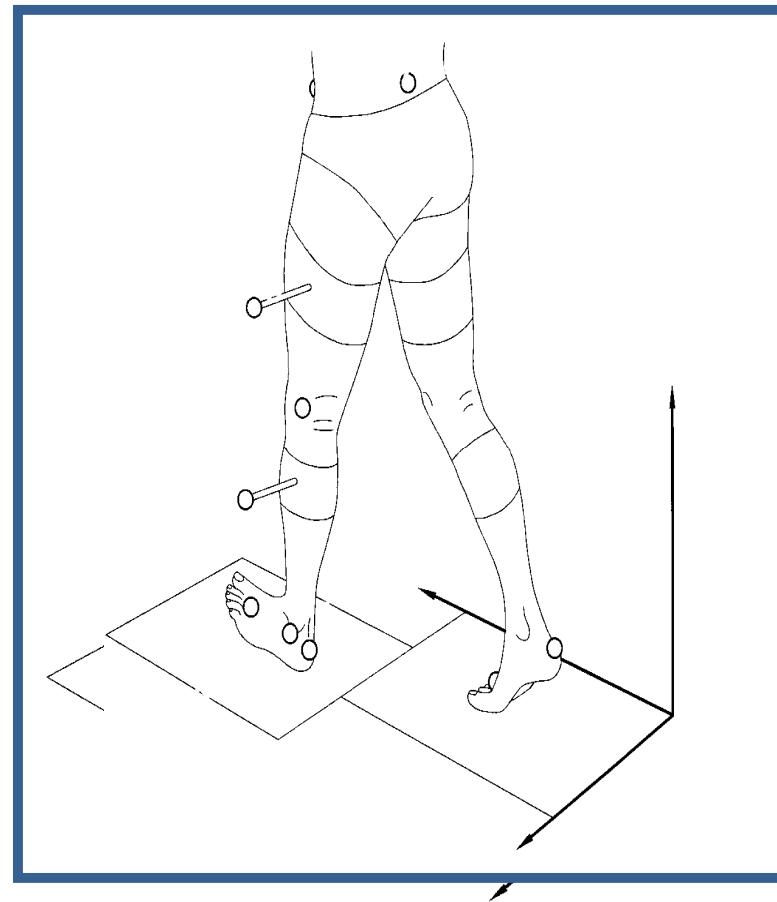
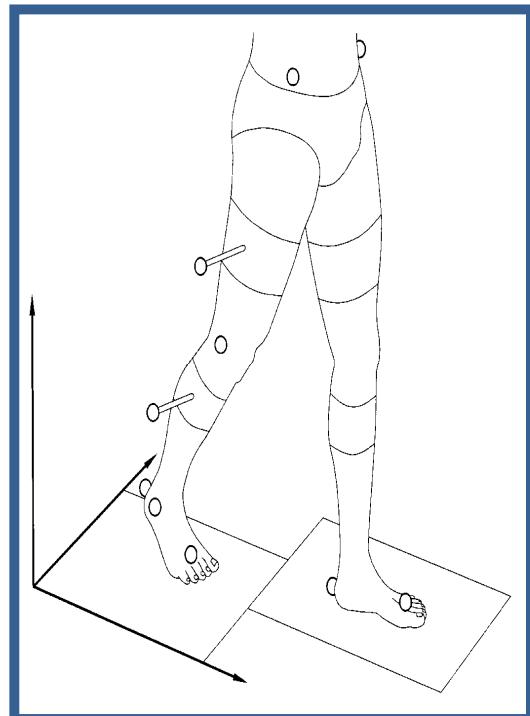


Acquisizione dei dati



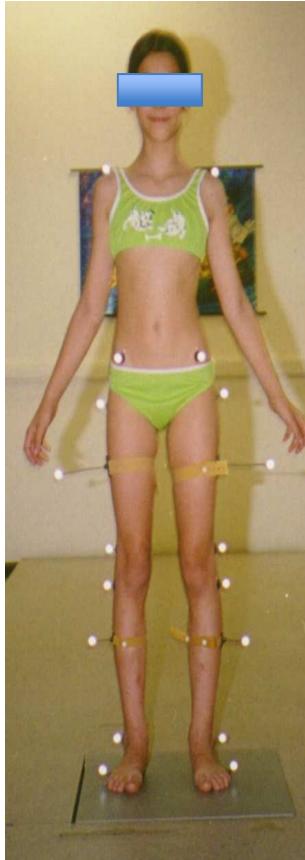
Diverse configurazioni dei marker

Protocollo Helen Hayes Hospital (marcatori anatomico-tecnici)

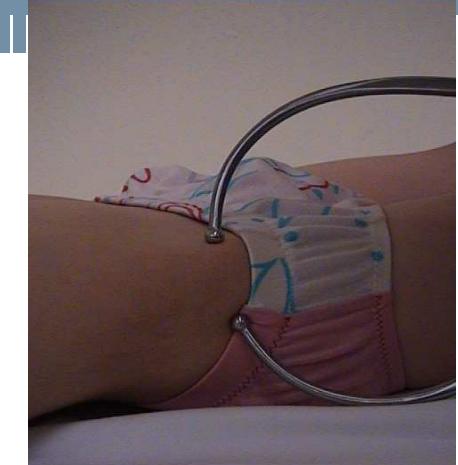


Helen Heyes Marker Set

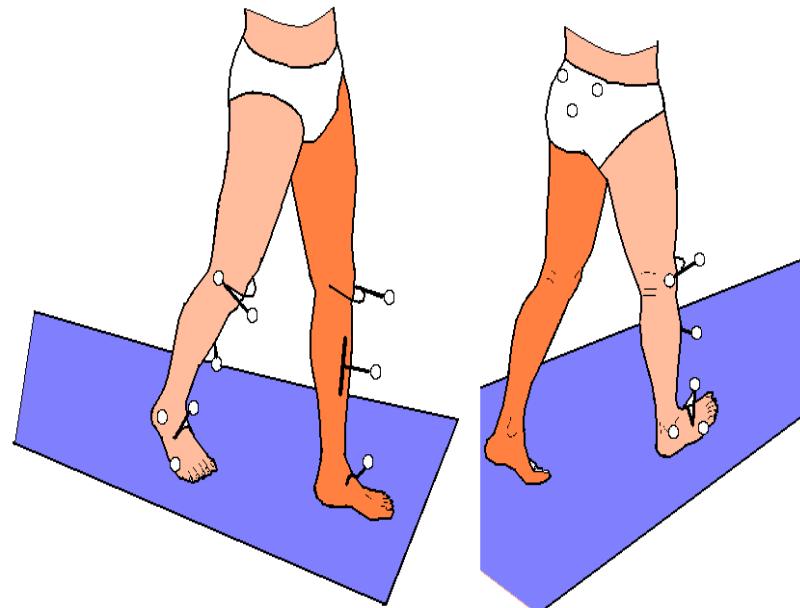
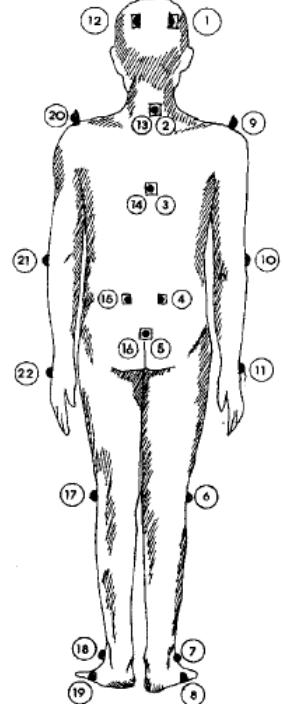
R. B. Davis, “A gait analysis data collection and reduction technique,”
Hum. Mov. Sci., vol. 10, pp. 575-587, 1991.



Misure antropometriche Helen Heyes Marker Set



Protocollo SAFLo (marcatori anatomico-tecnici)

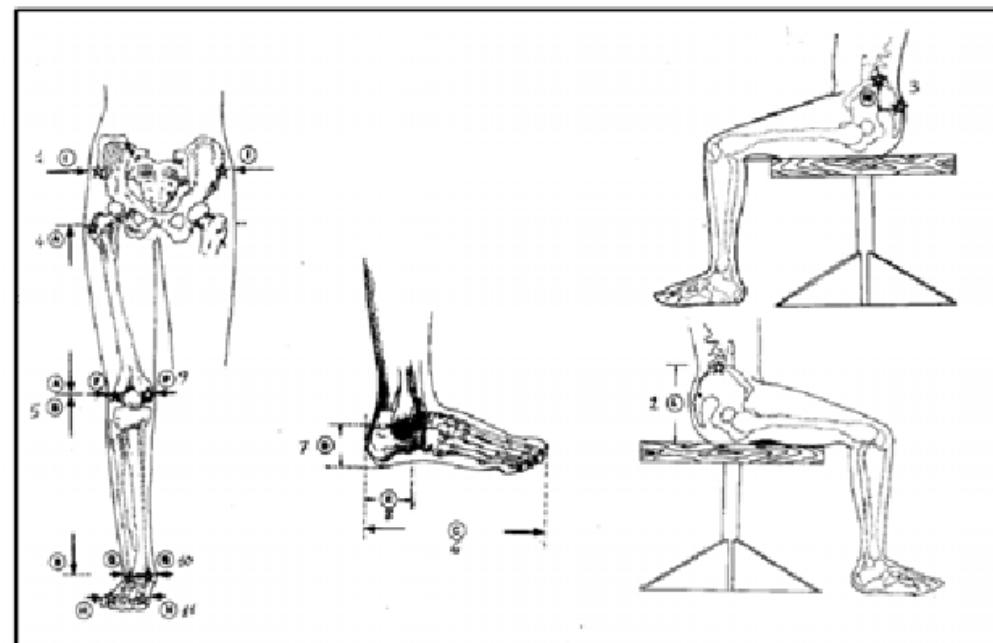
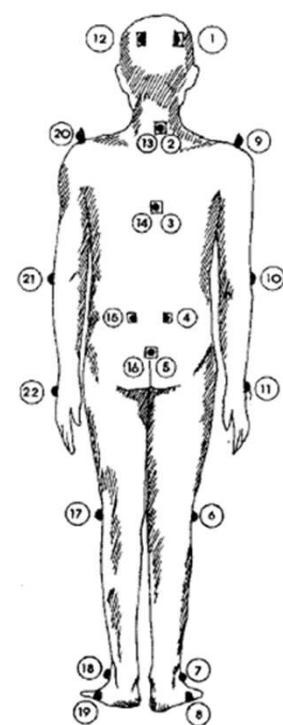


Frigo C, Rabuffetti M, Kerrigan DC, Deming LC, Pedotti A.

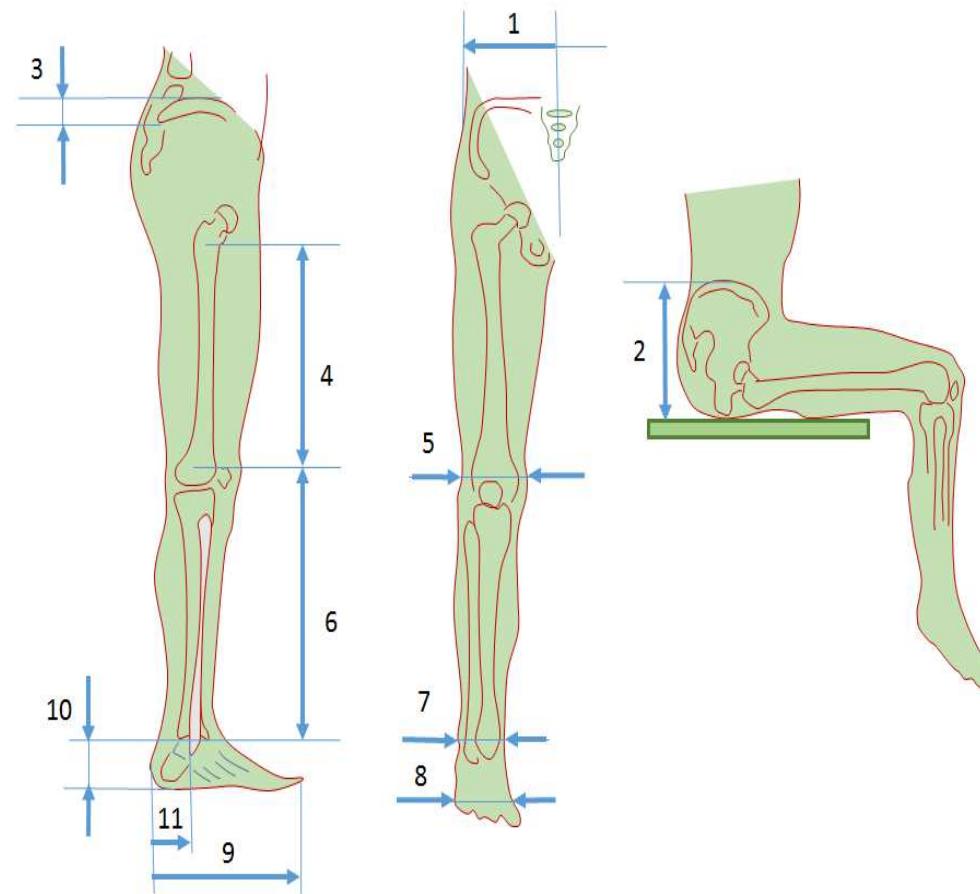
**“Functionally oriented and clinically feasible
quantitative gait analysis method.”**

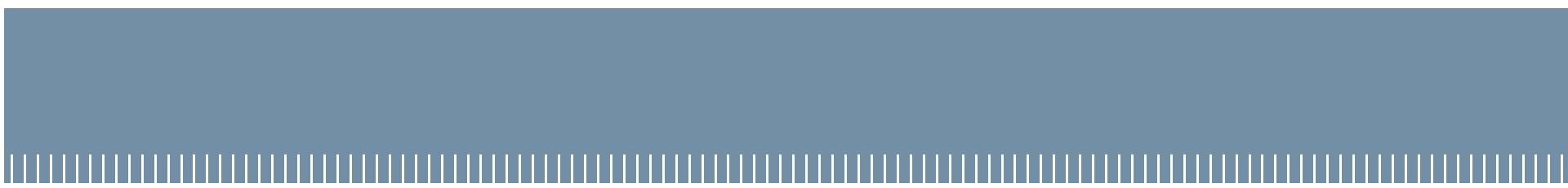
Med Biol Eng Comput 1998; 36: 179-185

Misure antropometriche – Protocollo SAFLO



Misure antropometriche da inserire nel modello

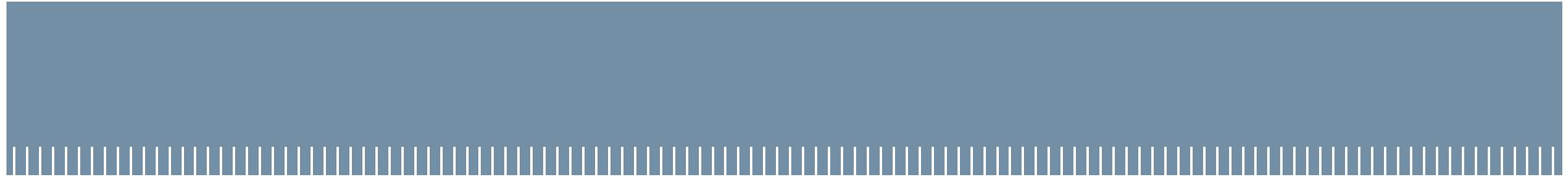




MODELLI BIOMECCANICI PER L'ANALISI DEL MOVIMENTO

Costruzione del modello cinematico a partire dai marcatori esterni

- 1) Identificazione di punti solidali con lo scheletro e (**markers 'tecnicici'**)
- 2) Identificazione di punti anatomici per la definizione degli **assi anatomici** di ciascun segmento
- 3) Identificazione di punti dotati di significato funzionale (i **centri di istantanea rotazione**), e definizione degli **assi articolari**
- 4) Descrizione del movimento congruente con la descrizione fisiologica (**angoli articolari**).

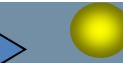


ESEMPIO

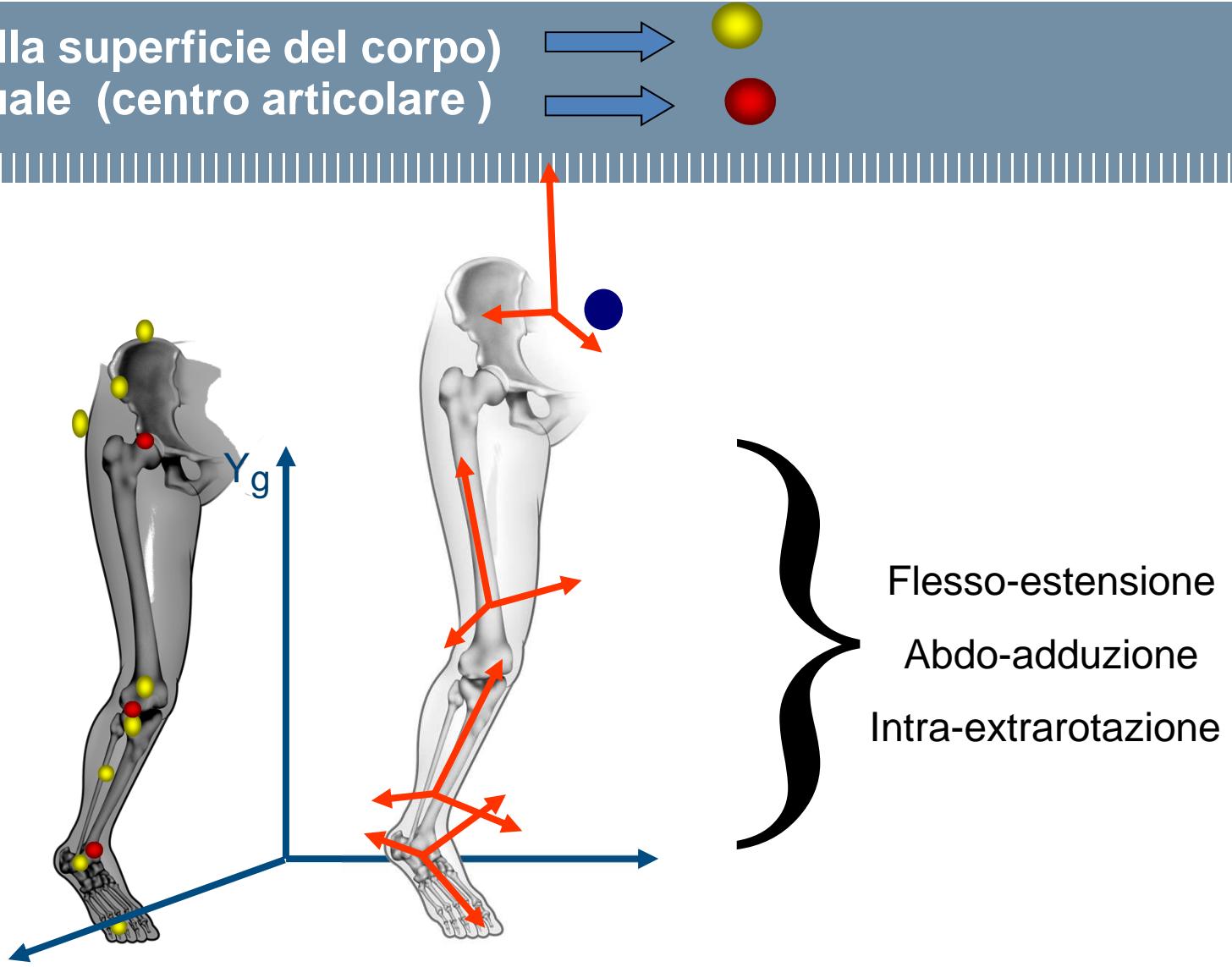
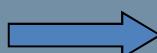
Come procedere

- 1) Marcatori tecnici coincidenti con i marcatori anatomici
- 2) Marcatori tecnici completamente svincolati da marcatori anatomici
- 3) Utilizzo misto: alcuni marcatori tecnici sono anche punti anatomici.

Marker (sulla superficie del corpo)



Marker virtuale (centro articolare)

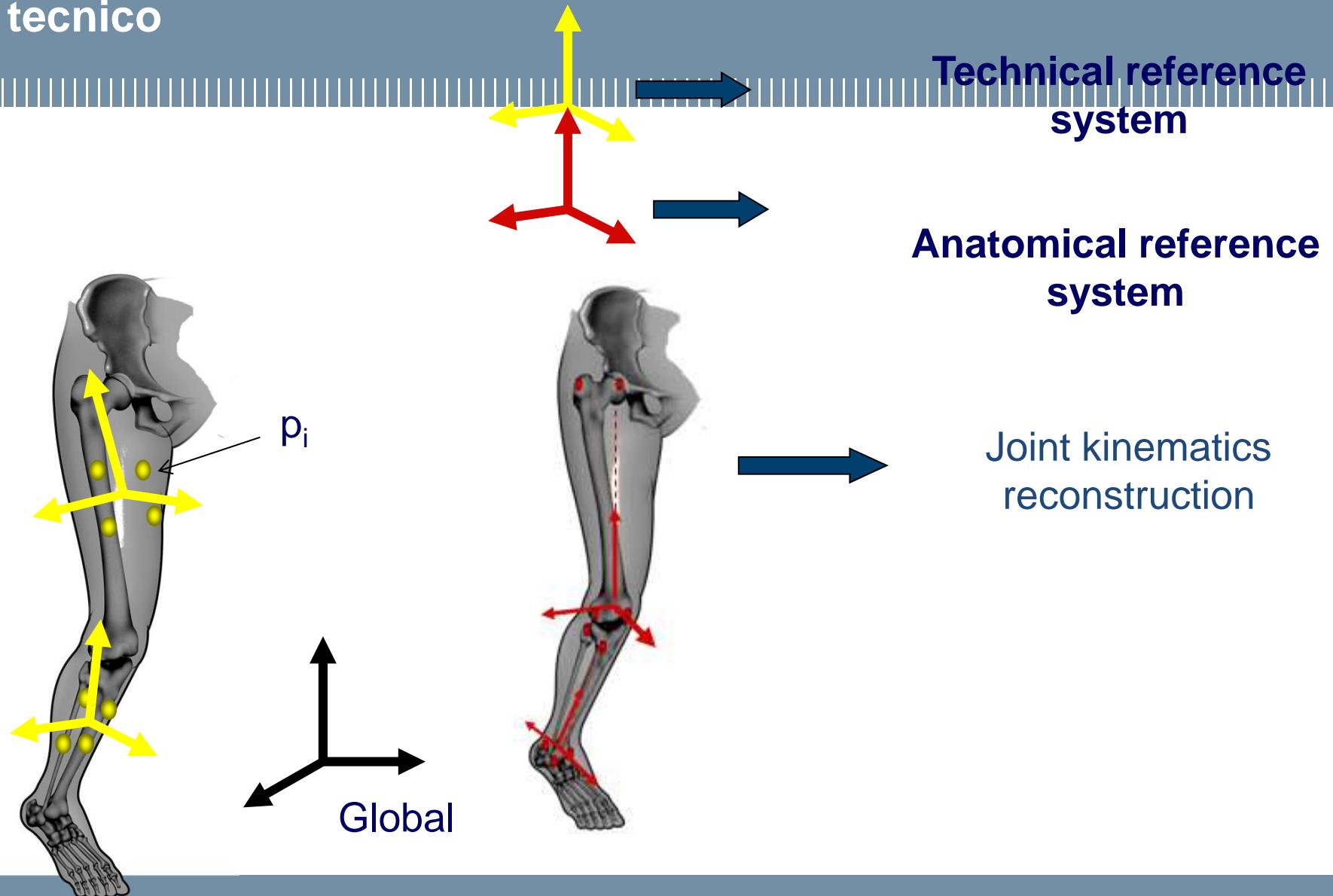


Flesso-estensione

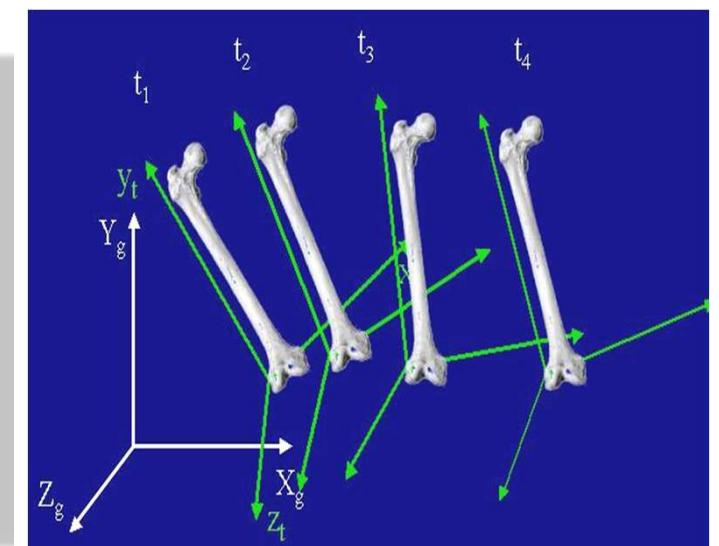
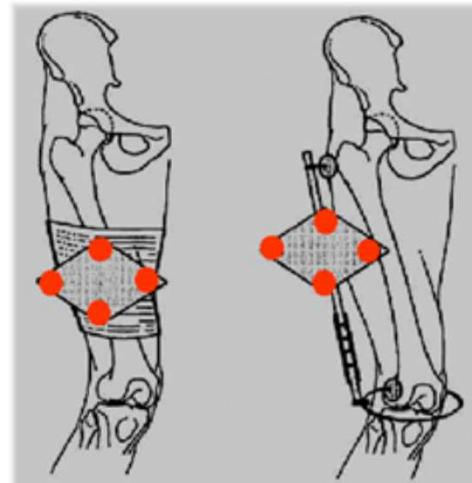
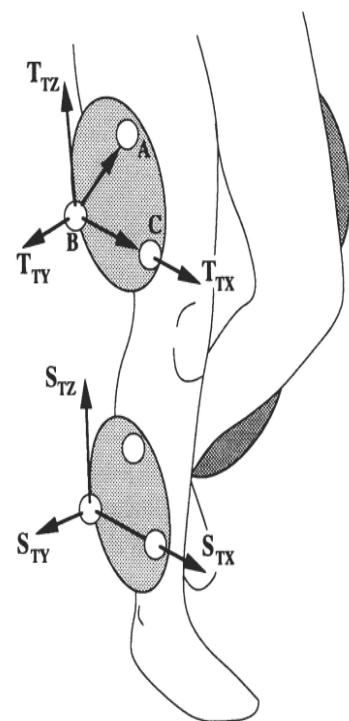
Abdo-adduzione

Intra-extrarotazione

Relazione tra un punto anatomico e il sistema di riferimento tecnico



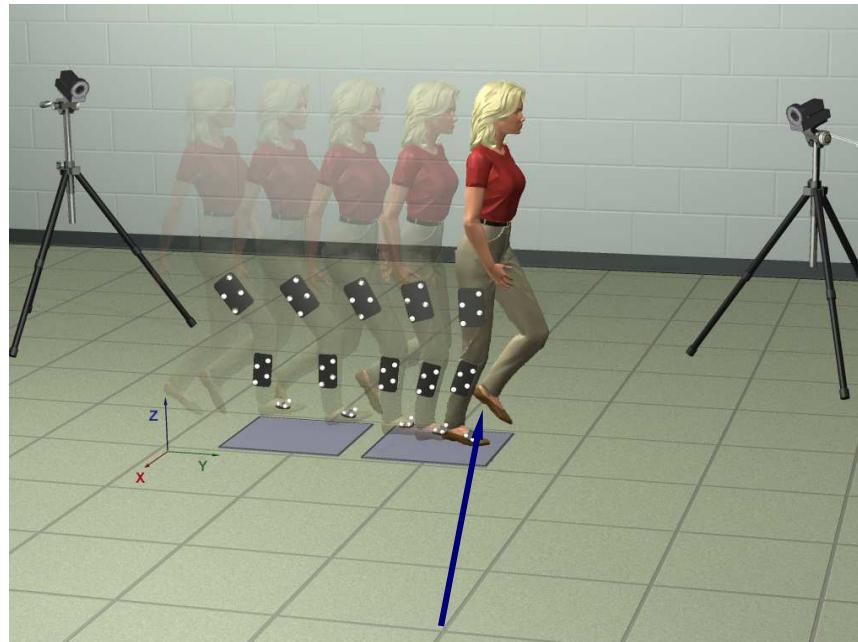
Cinematica – Protocollo CAST



Cluster di marcatori esterni

Protocolli TECNICI

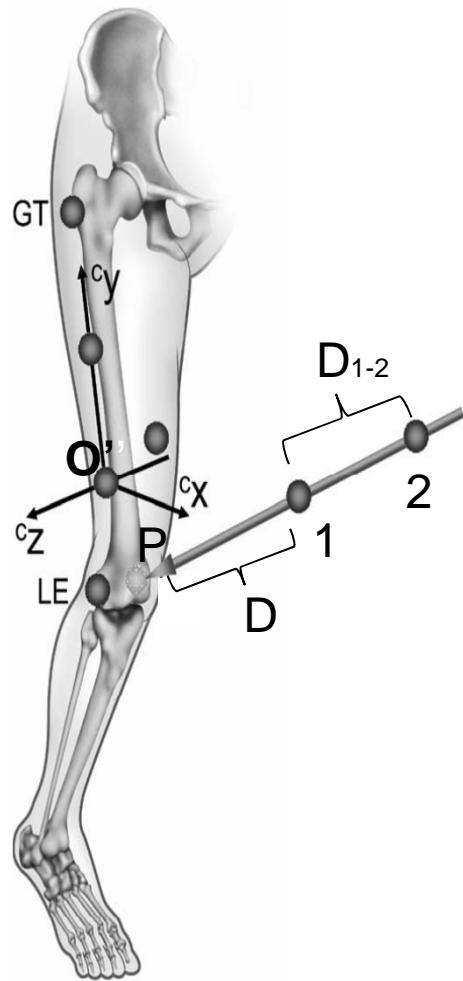
Protocollo tecnico



CAST protocol (Calibrated Anatomical System Technique)

(Cappozzo et al, 1995)

Calibrazione anatomica



$$X_P = X_1 + D \alpha_x; \quad Y_P = Y_1 + D \alpha_y; \quad Z_P = Z_1 + D \alpha_z$$

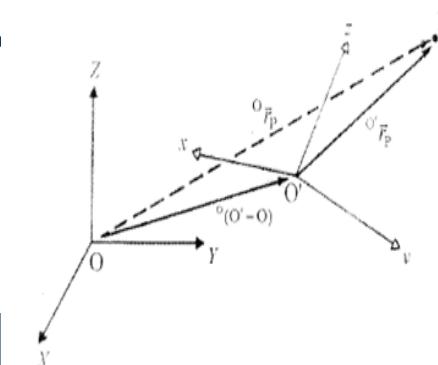
dove X_P, Y_P, Z_P sono le coordinate della punta del bastoncino

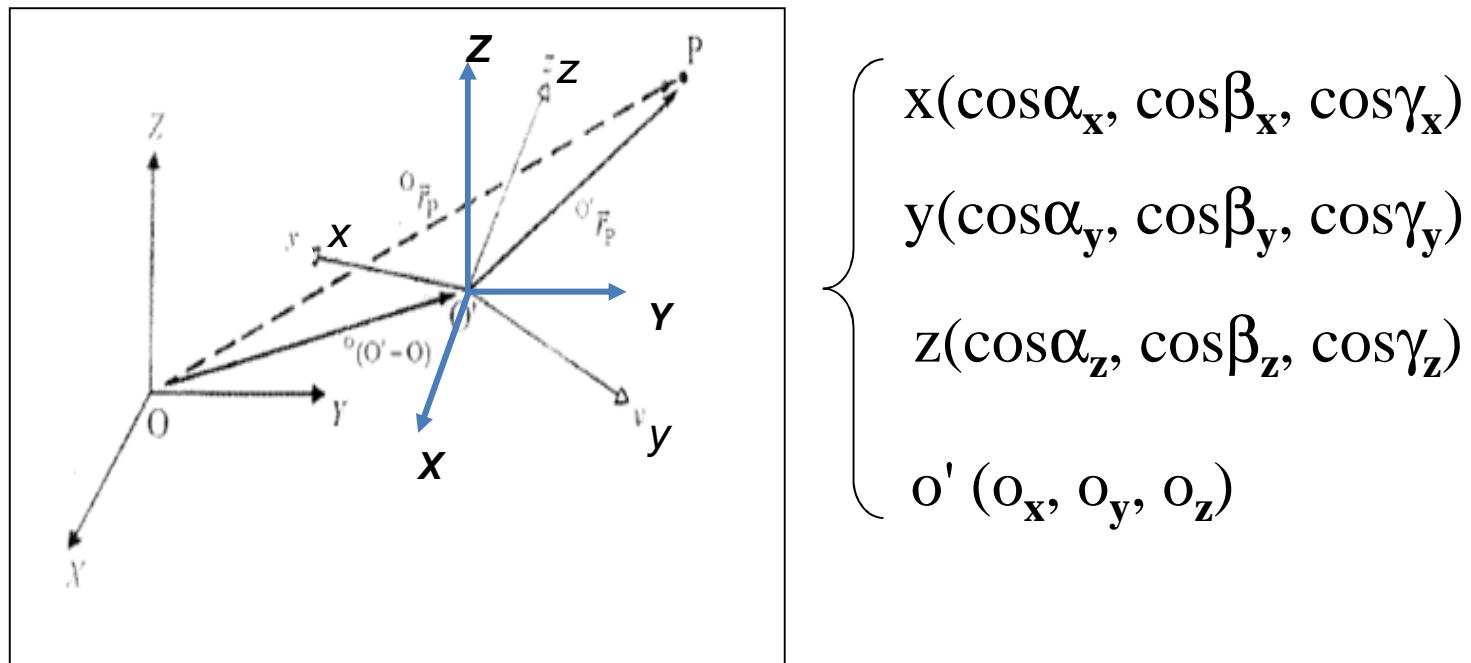
X_1, Y_1, Z_1 sono le coordinate di uno dei due marcatori sul bastoncino

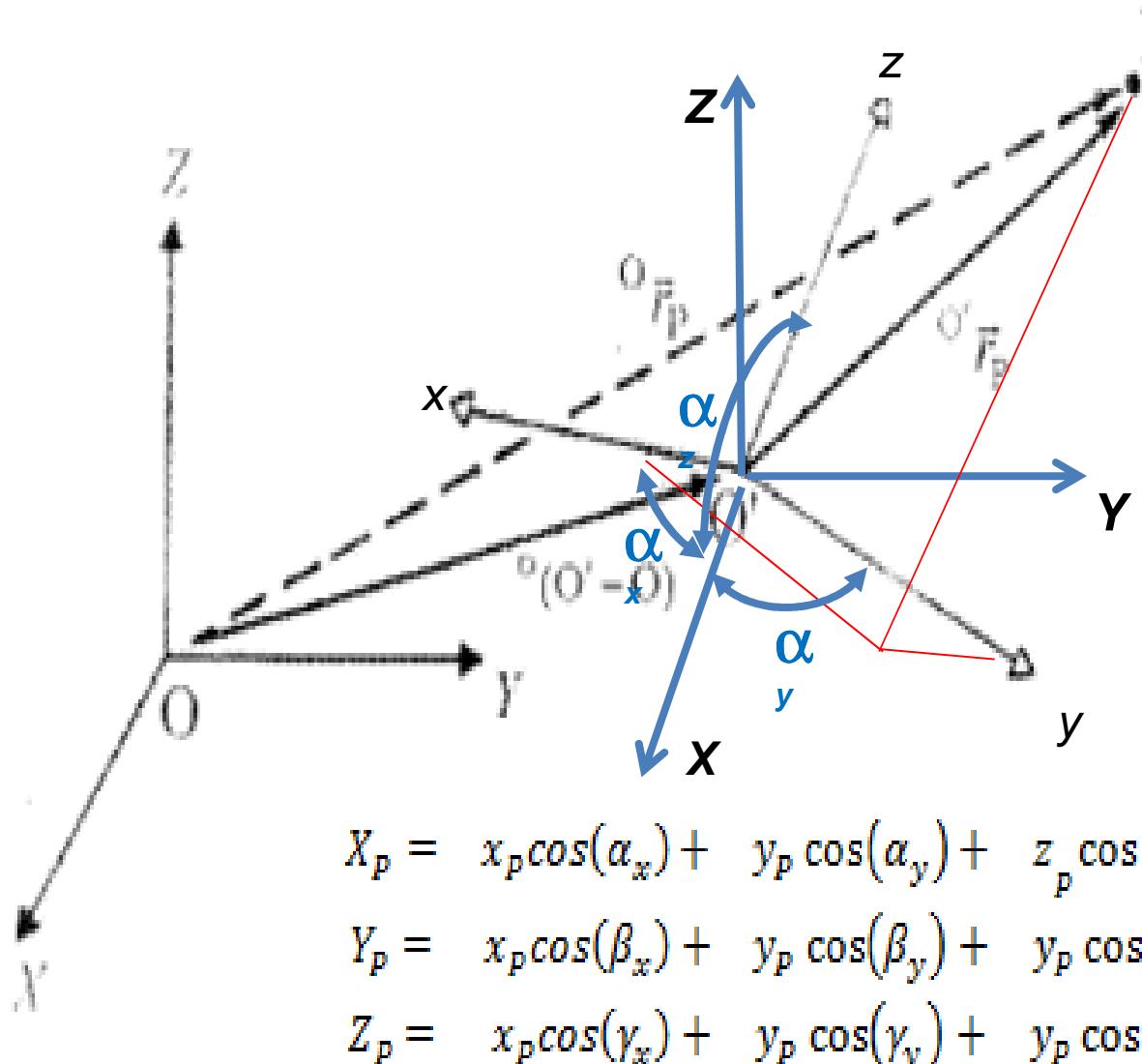
$$D = \sqrt{(X_1 - X_p)^2 + (Y_1 - Y_p)^2 + (Z_1 - Z_p)^2}$$
$$D_{1-2} = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$$
$$\alpha_x = \frac{(X_2 - X_1)}{D_{1-2}}; \quad \alpha_y = \frac{(Y_2 - Y_1)}{D_{1-2}}; \quad \alpha_z = \frac{(Z_2 - Z_1)}{D_{1-2}}$$

$$(P - O') = (P - O) - (O' - O)$$

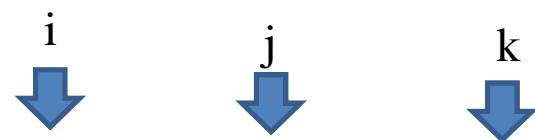
D noto







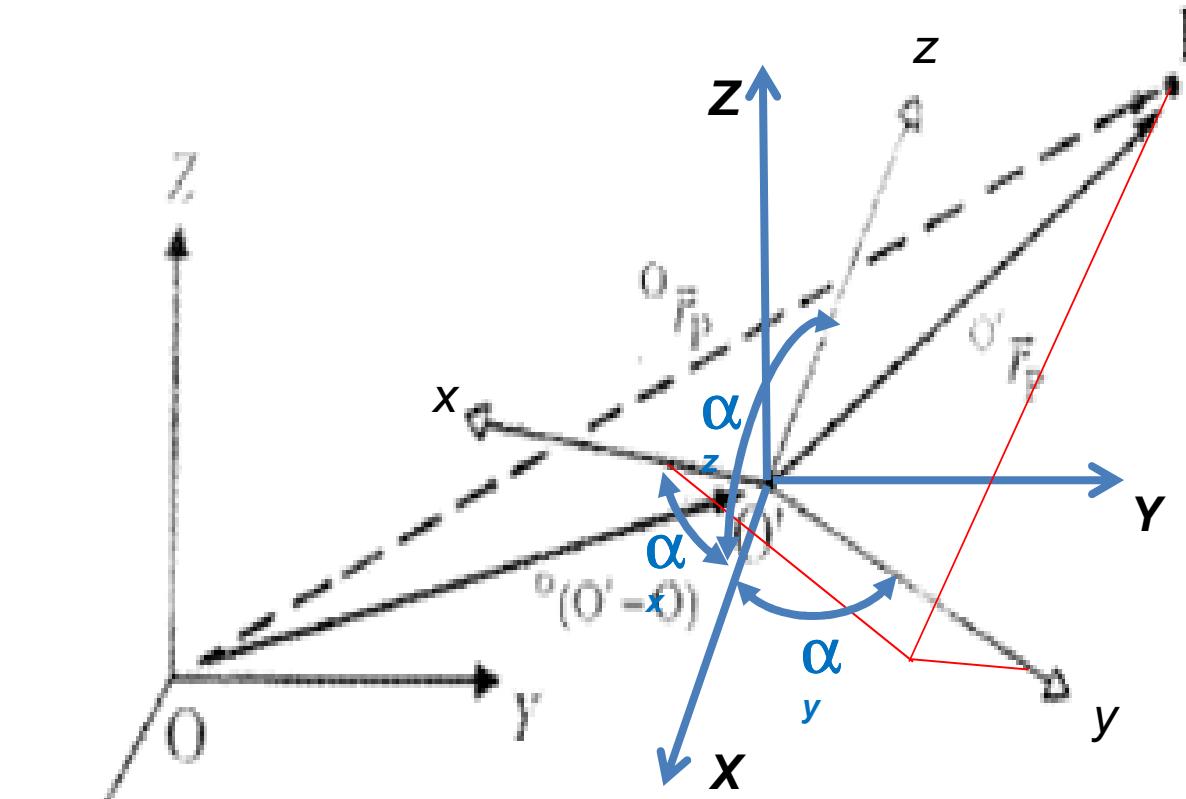
$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_x) & \cos(\alpha_y) & \cos(\alpha_z) \\ \cos(\beta_x) & \cos(\beta_y) & \cos(\beta_z) \\ \cos(\gamma_x) & \cos(\gamma_y) & \cos(\gamma_z) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = [{}^oR] \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix}$$

i j k


Matrice di rotazione
da o' a o

$$[{}^oR] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_x) & \cos(\alpha_y) & \cos(\alpha_z) \\ \cos(\beta_x) & \cos(\beta_y) & \cos(\beta_z) \\ \cos(\gamma_x) & \cos(\gamma_y) & \cos(\gamma_z) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \leftarrow I \\ \leftarrow J \\ \leftarrow K \end{array}$$

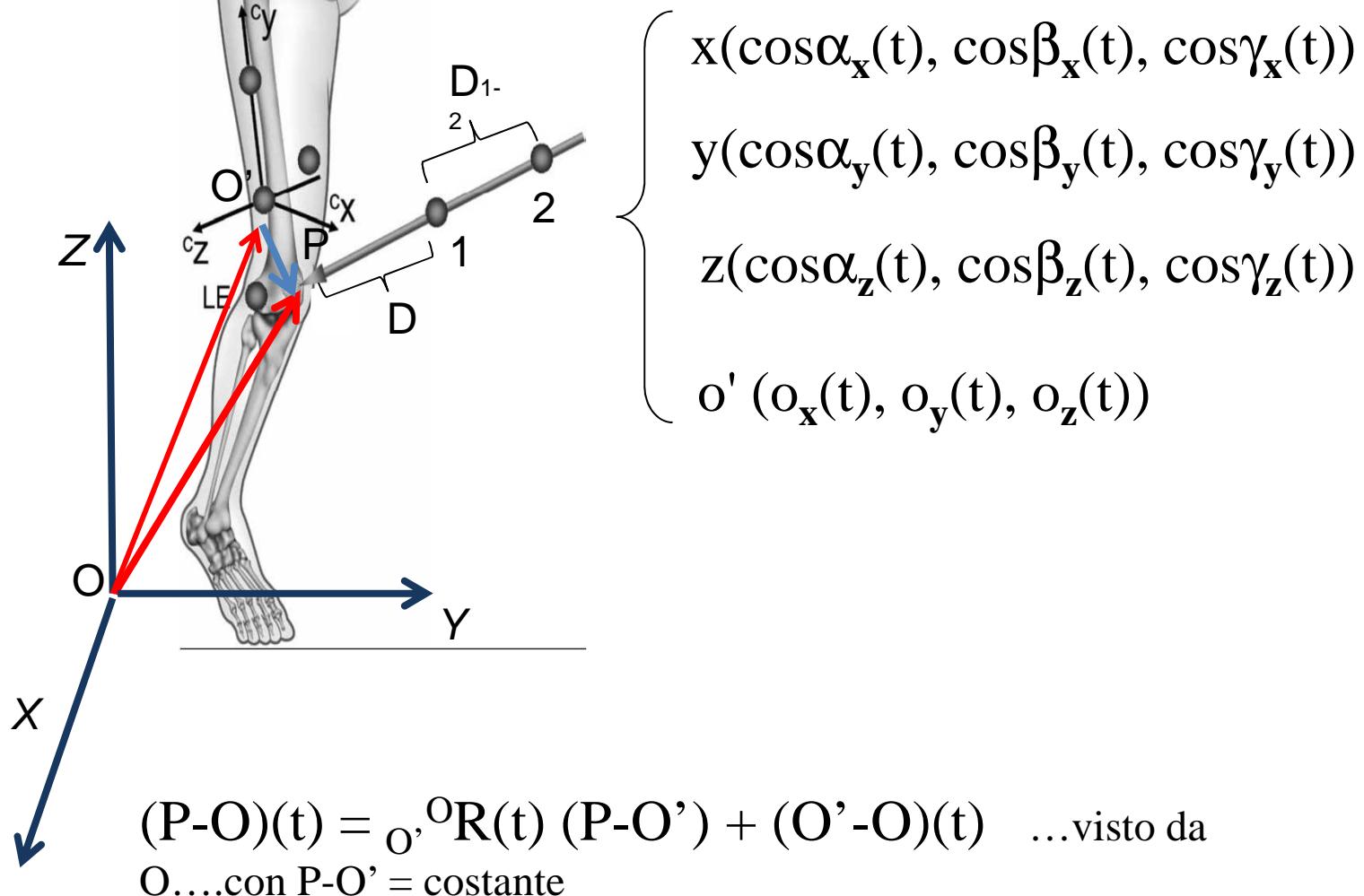
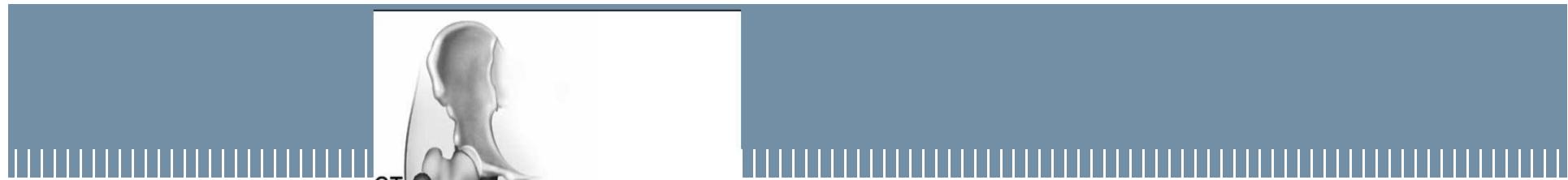
Proprietà: ${}^oR^{-1} = {}^oR^T$



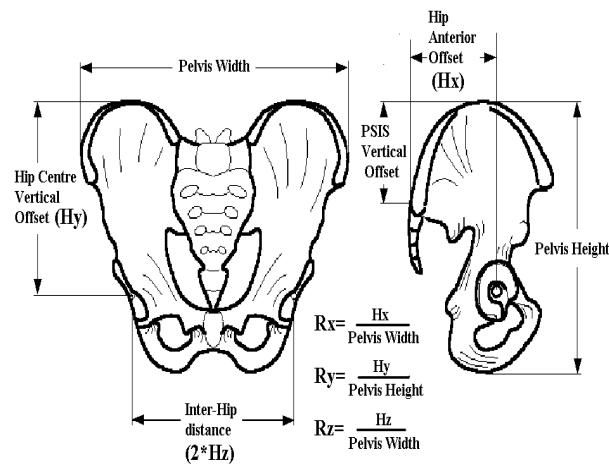
$$(P-O) = {}_O{}^0 R (P-O') + (O'-O) \quad \dots \text{visto da } O$$

$$(P-O') = {}_{O'}{}^0 R^{-1} [(P-O) - (O'-O)] \quad \dots \text{visto da } O'$$

$$= {}_{O'}{}^0 R^T (P-O) - {}_{O'}{}^0 R^T (O'-O)$$



Approccio morfologico



Sono state così ricavate equazioni di regressione che forniscono R_y e R_z in funzione di parametri misurati sul soggetto (peso, altezza, età ecc.).

L'equazione di regressione, in generale ha questa forma:

$$A = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + \dots + B_n \cdot X_n = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i \cdot X_i$$

dove $A = \{R_y, R_z\}$

B_i = Coefficienti dell'equazione di regressione (di correlazione lineare)

X_i = Fattori antropometrici considerati (variabili indipendenti)

$$i = 0, 1, \dots, n$$

In media risulta:

$R_y = 0.69$ con una deviazione standard $\sigma_y = \pm 0.03$ per i maschi,

$R_y = 0.71$ con $\sigma_y = \pm 0.03$ per le femmine.

$R_z = 0.63$ con $\sigma_z = \pm 0.03$ per i maschi,

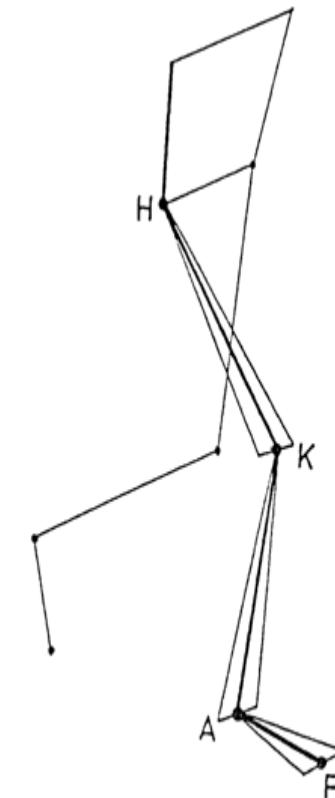
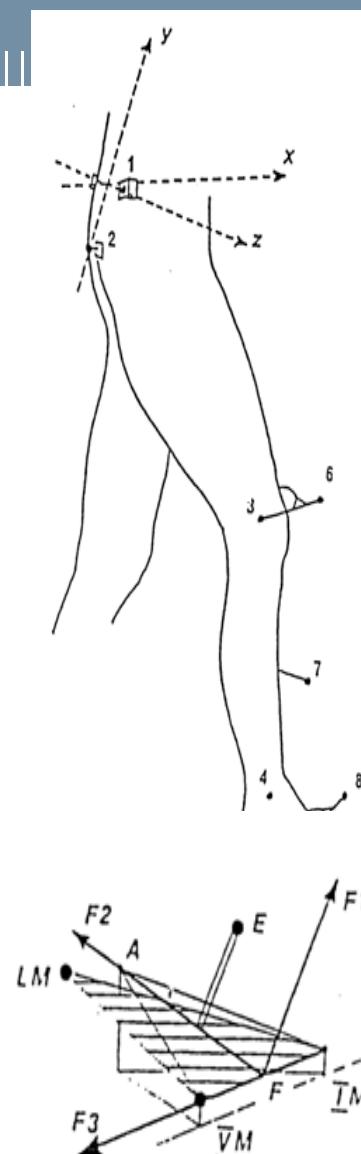
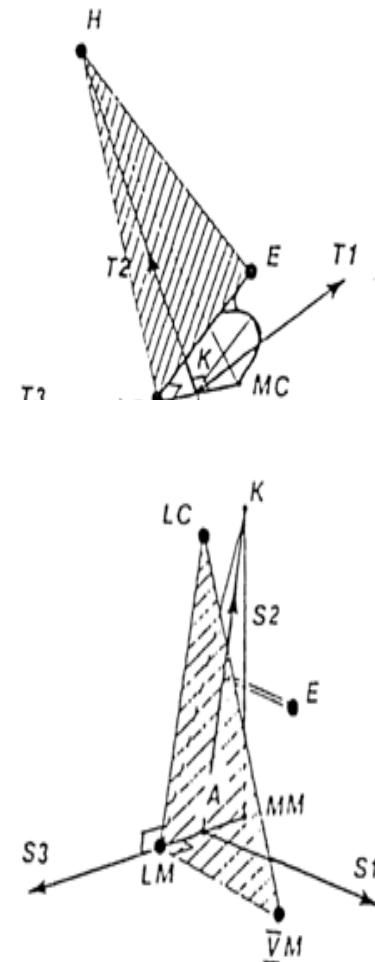
$R_z = 0.63$ con $\sigma_z = \pm 0.04$ per le femmine.

Le coordinate Y_H e Z_H dei centri delle articolazioni della anche destra (r) e sinistra (l) rispetto al sistema di riferimento pelvico, sono stimate con le seguenti formule:

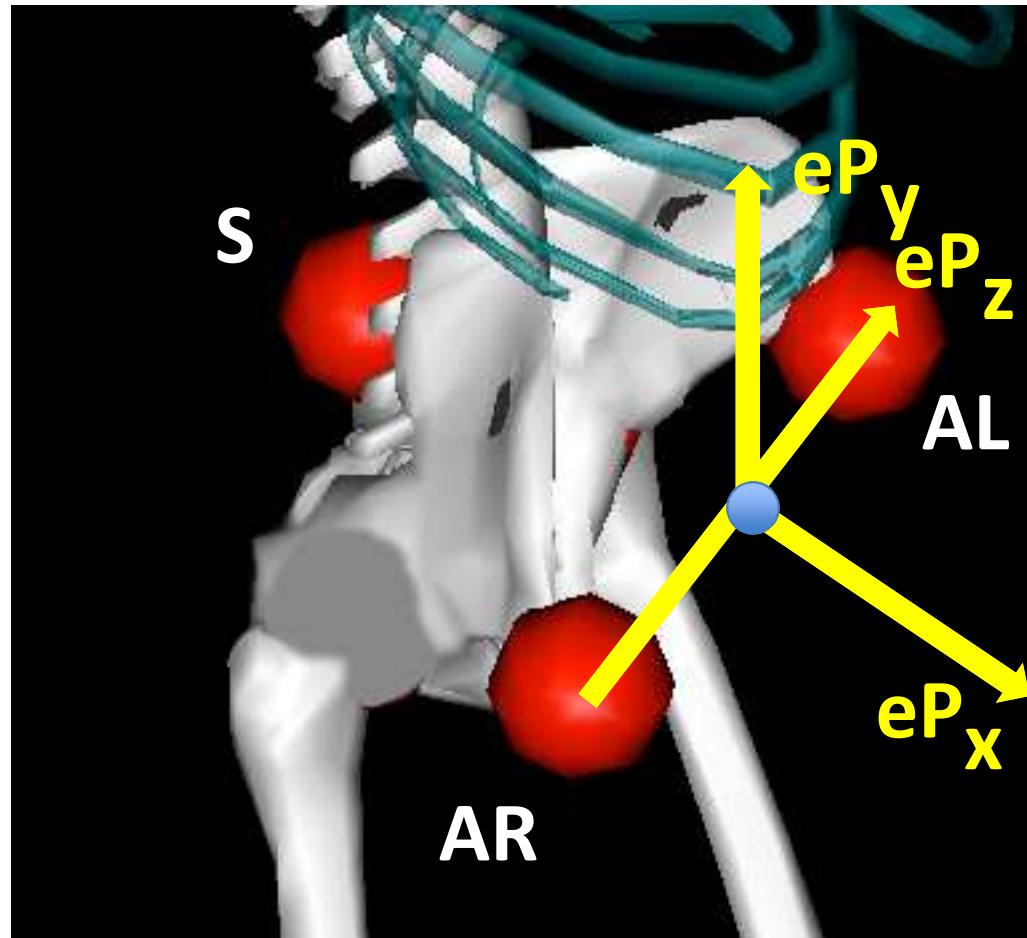
$$Y_{H,r} = Y_{H,l} = VD \cdot PH \cdot R_y$$

$$Z_{H,r} = -Z_{H,l} = R_z \cdot \left(\frac{PW}{2} - ST \right) \text{ con } ST = \text{spessore della pelle} (\approx 5 \text{ mm})$$

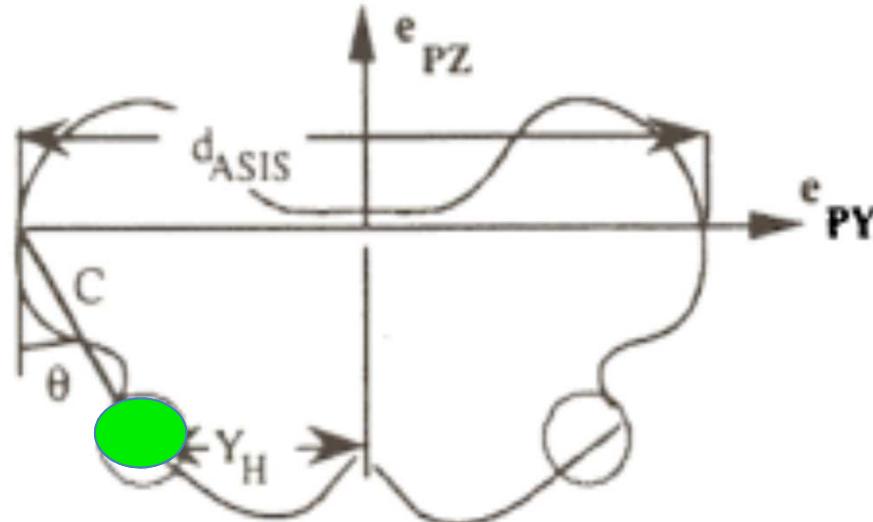
Assi dei sistemi di riferimento locali



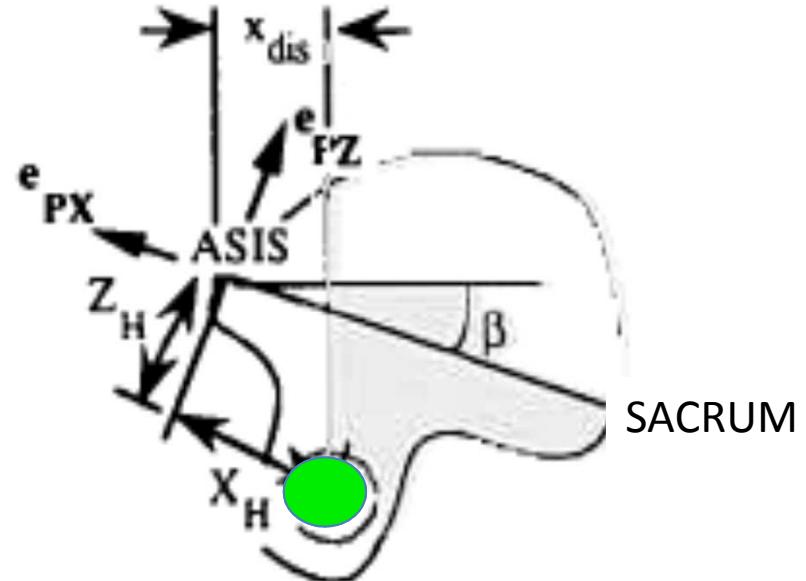
PELVIS



HIP



Coronal Plane View



Sagittal Plane View

$\theta: 28.4 \pm 6.6$ degrees

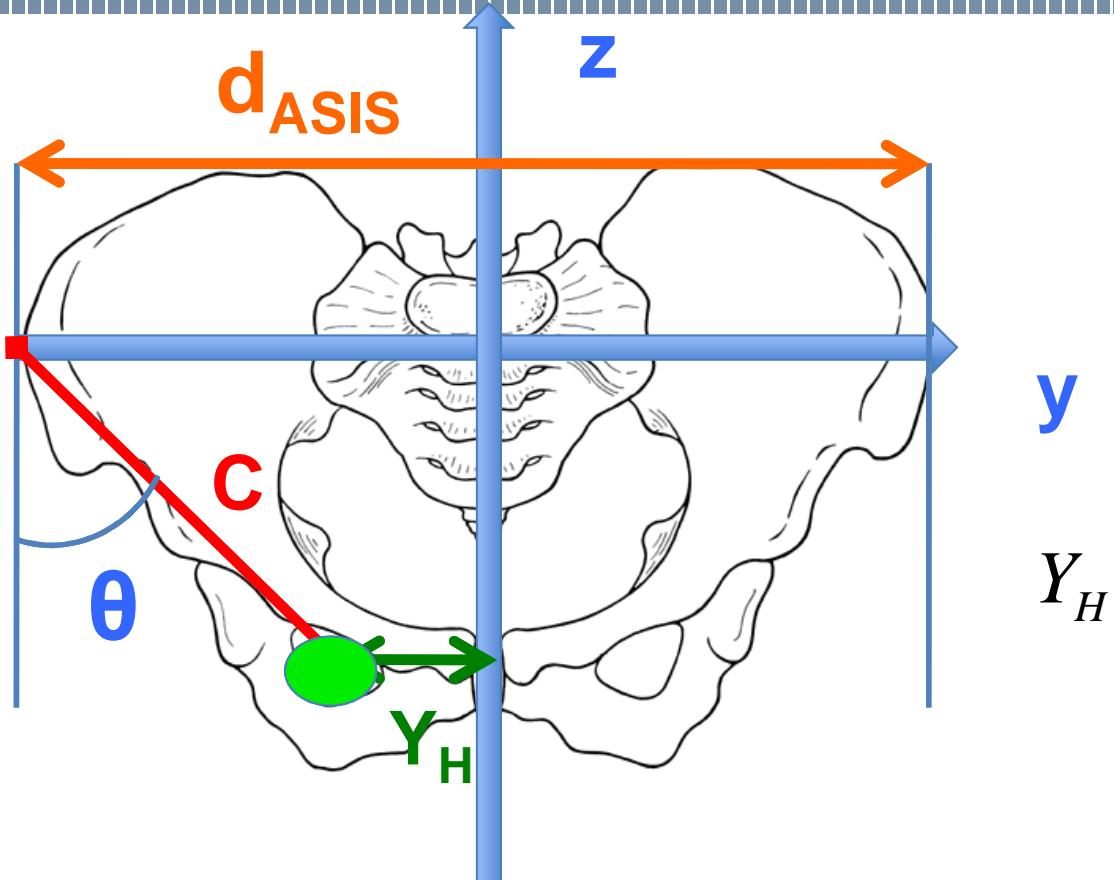
$\beta: 18 \pm 4$ degrees

$$C = 0.115L_{leg} - 0.0153$$

L_{leg} = antrop

25 radiografie di anca
(Newington Children Hospital, 1981)

Centro articolare anca



$$Y_H = S \cdot \left[C \sin(\theta) - \frac{d_{ASIS}}{2} \right]$$

dASIS = antrop

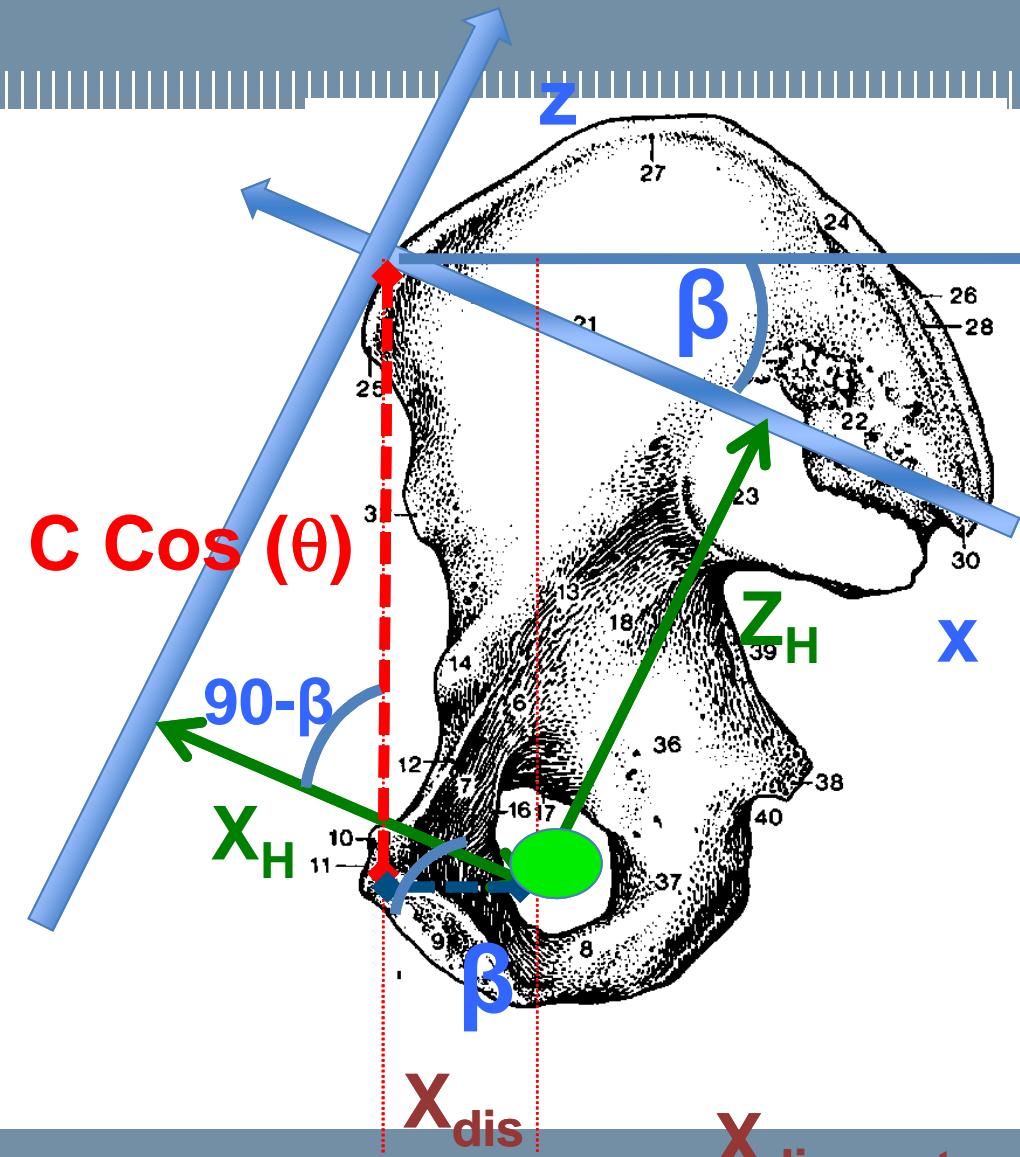
HIP

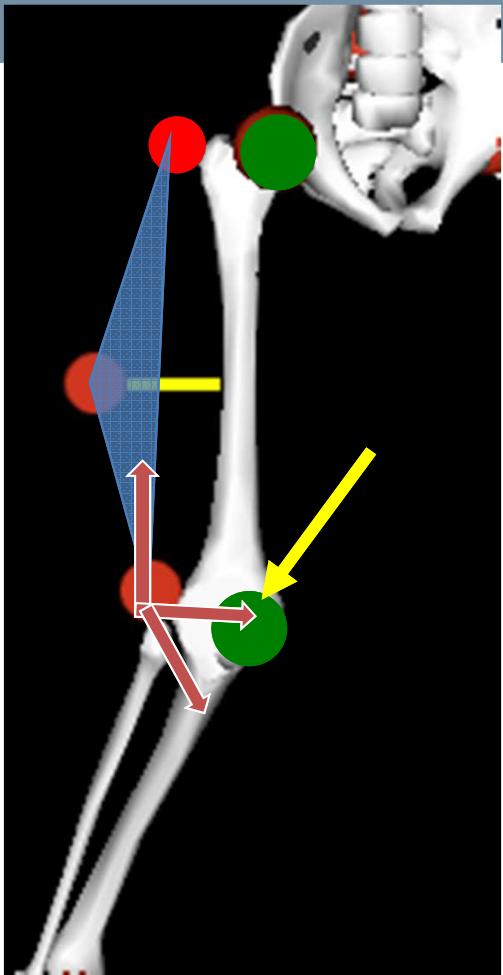
$$X_H = [-x_{dis}] \cos(\beta) - C \cos(\theta) \sin(\beta)$$

$$Y_H = S \cdot \left[C \sin(\theta) - \frac{d_{ASIS}}{2} \right]$$

$$Z_H = [-x_{dis}] \sin(\beta) - C \cos(\theta) \cos(\beta)$$

$$\text{Hip} = (X_H, Y_H, Z_H)$$

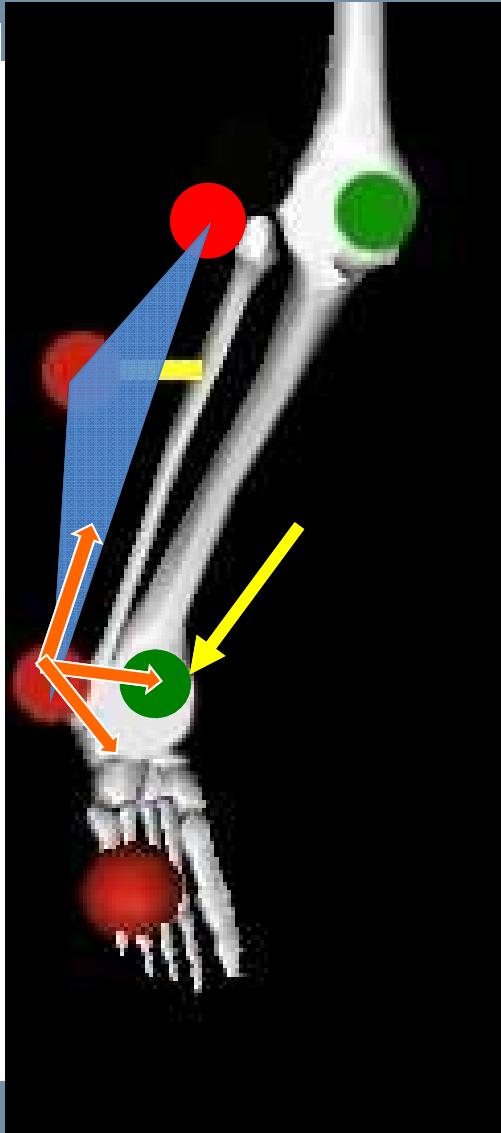




$$x_K = 0$$

$$z_K = S(r_{marker} + 0.5w_{Knee})$$

$$y_k = 0$$



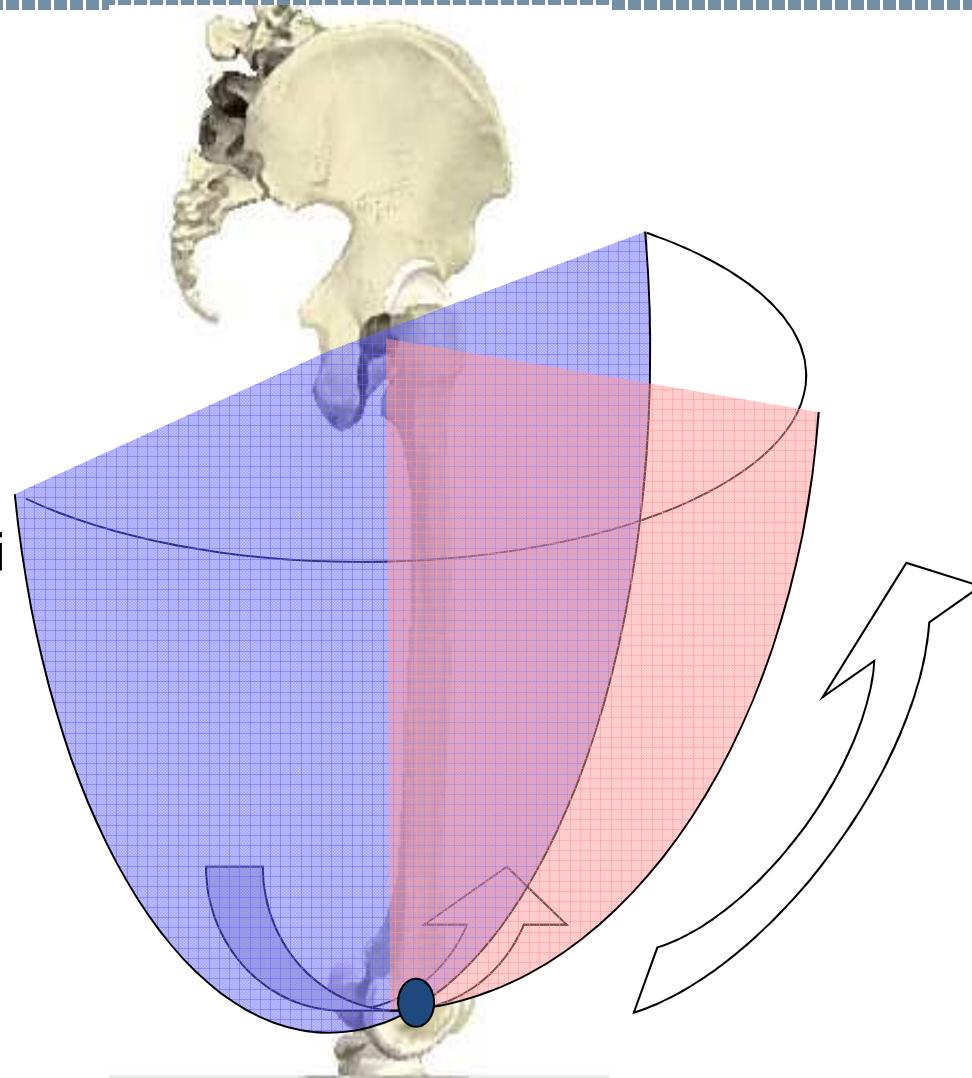
$$x_A = 0$$

$$z_A = S(r_{marker} + 0.5w_{ankle})$$

$$y_A = 0$$

Necessità di migliorare la stima

Approccio funzionale
cinematico:
minimizzazione della
deviazione standard della
distanza tra i centri articolari



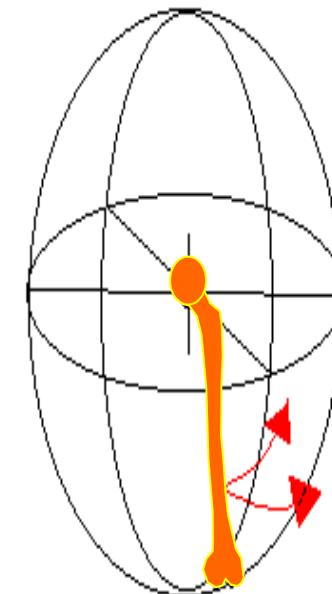
Identificazione ottimale centri articolari di Anca e Ginocchio

3 criteri:

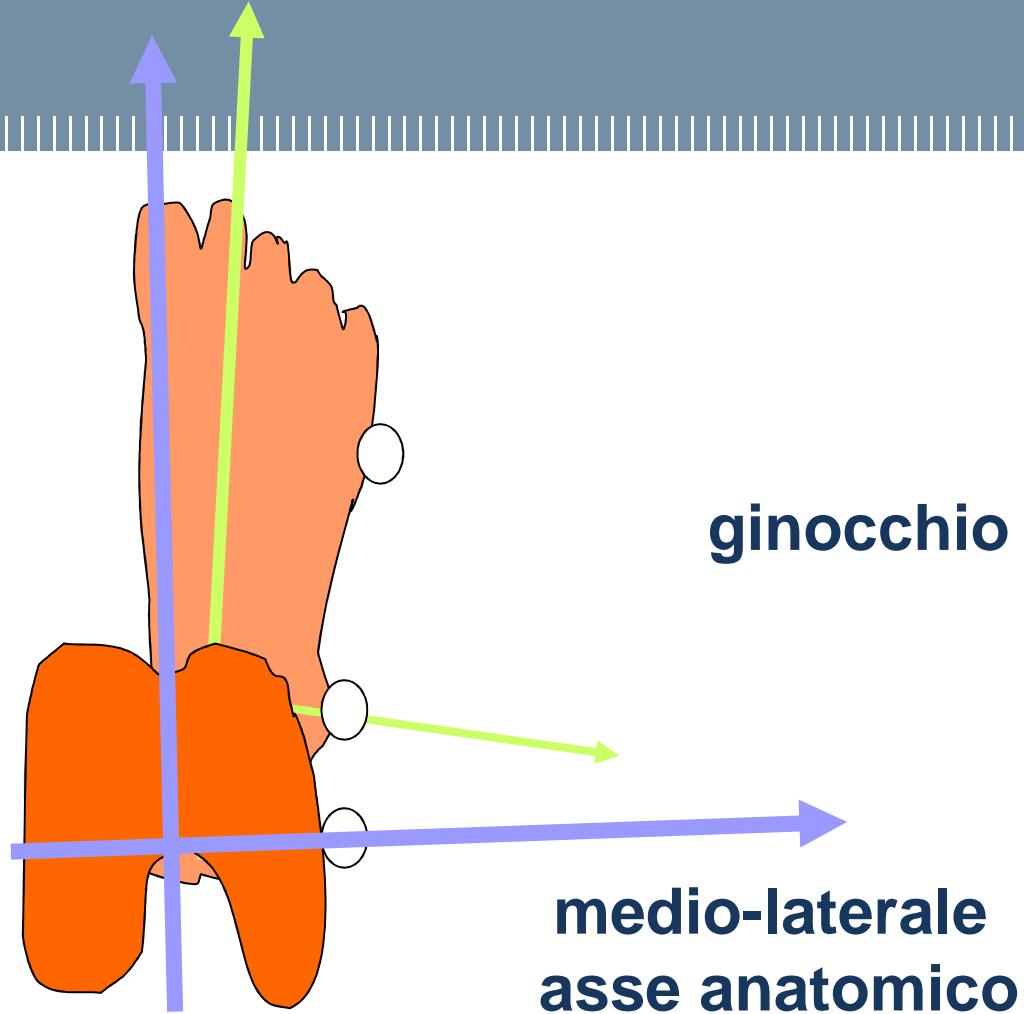
- Antropometrico (misure dirette)
- Statistico (approccio morfologico)
- Funzionale (vincoli cinematici)

Approccio multifattoriale:

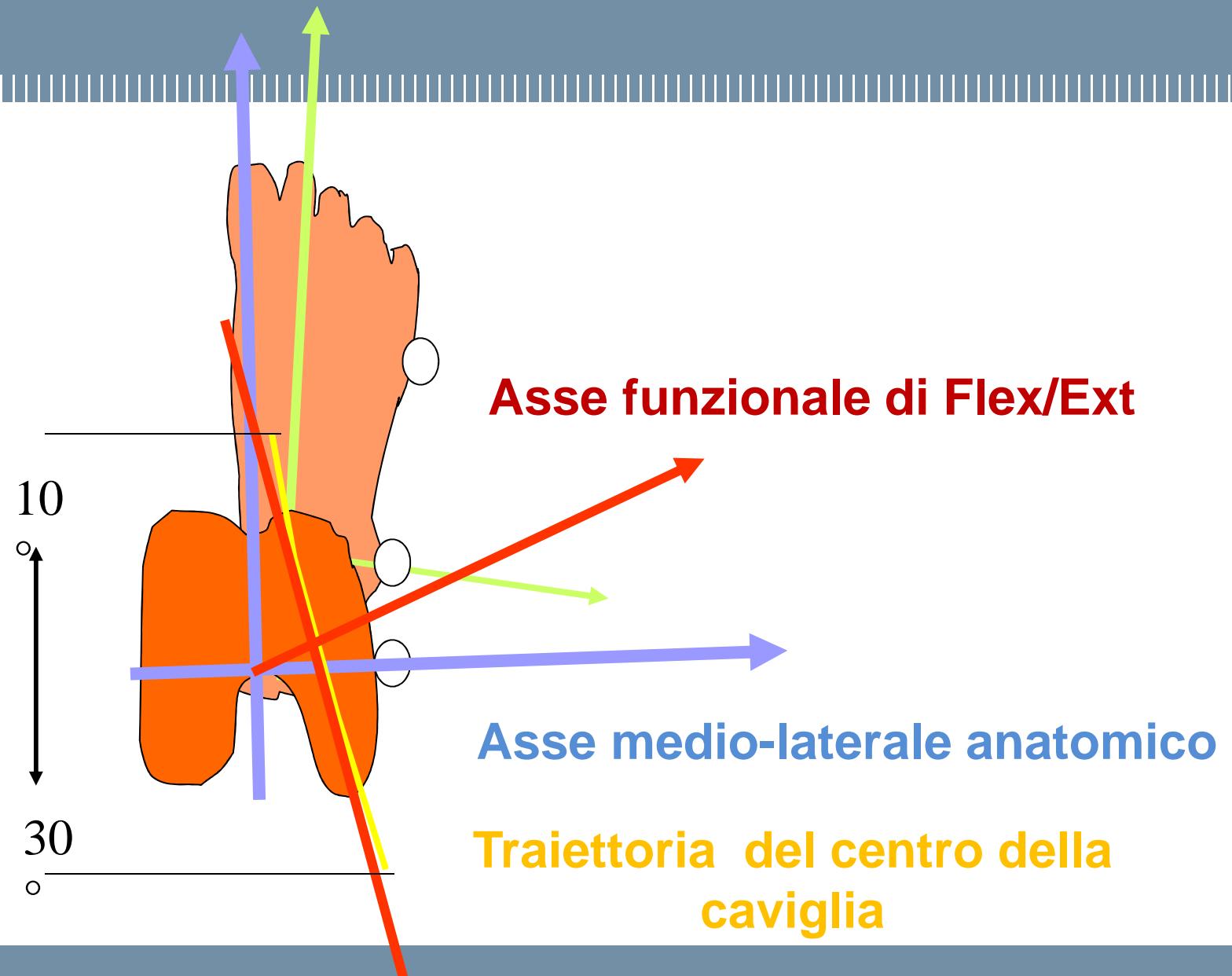
**Far convergere le
differenti stime verso una
soluzione ottima**



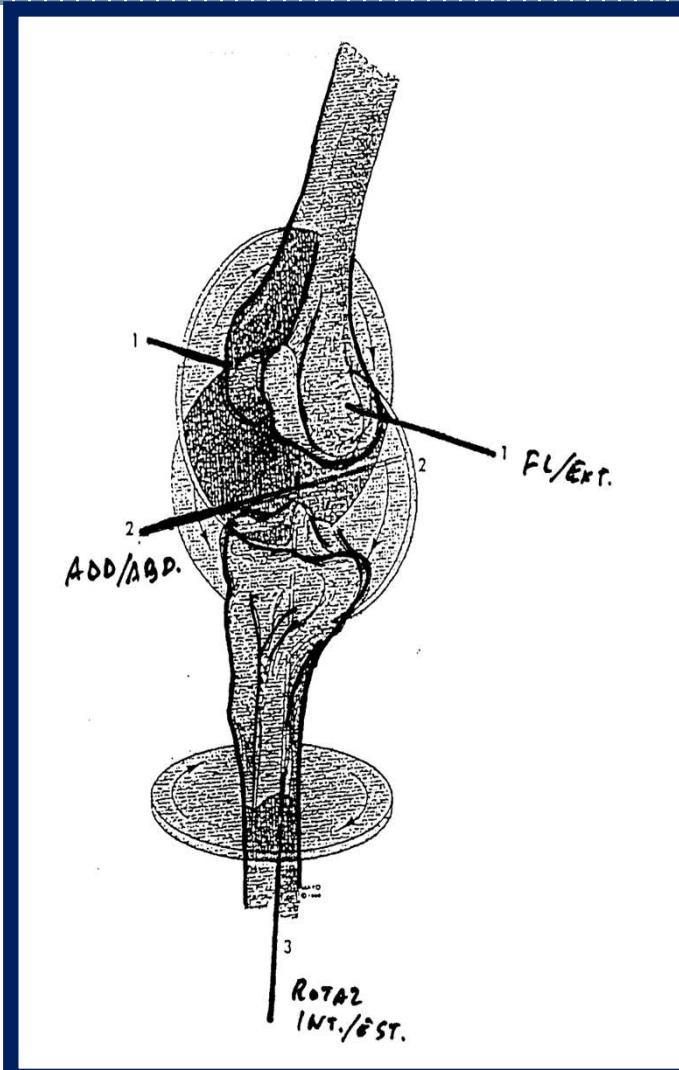
Assi Funzionali



Identificazione funzionale dell'asse di flesso-estensione del ginocchio

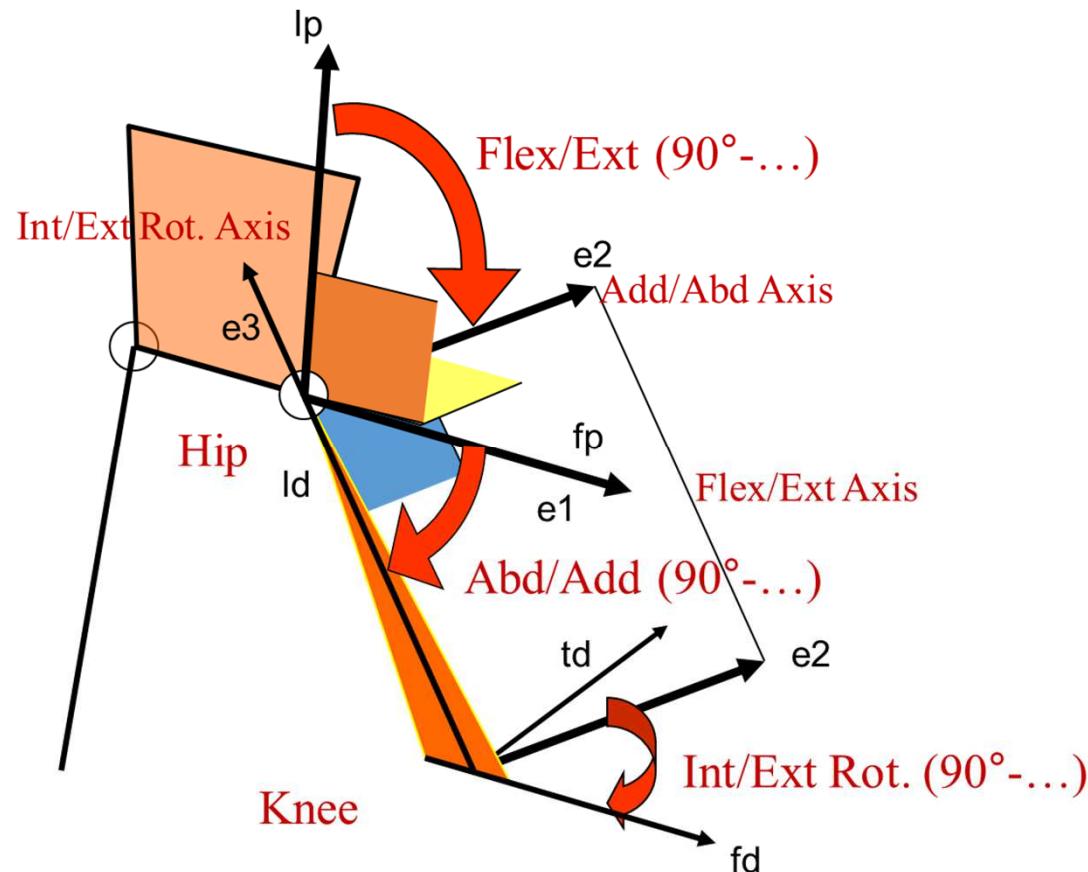


Angoli articolari di Grood & Suntay



- 1) Flesso/estensione: perpendicolare a piano ‘parasagittale’ del segmento prossimale e solidale con esso
- 2) Rotazione interna esterna: asse longitudinale del segmento distale
- 3) Adduzione/abduzione: asse mutuamente perpendicolare agli altri due

Grood&Suntay (con riferimento all'anca)



Calcolo delle variabili cinematiche e dinamiche

- **ANGOLI ASSOLUTI**- definiscono l'orientamento dei vari segmenti corporei nello spazio.
Sono calcolati nel piano sagittale come angoli tra una direzione di riferimento (verticale o orizzontale) e la direzione dell'asse longitudinale del corrispondente segmenti corporeo.
- **ANGOLI RELATIVI**- o angoli articolari e sono impiegati per valutare le rotazioni tra i vari segmenti corporei.
Flessione/estensione, adduzione/abduzione, rotazione interna/esterna
 - **REAZIONI D'APPOGGIO AL TERRENO**
tre componenti spaziali della forza di reazione d'appoggio, punto d'applicazione del vettore risultante, e momento torcente sul piano della pedana.

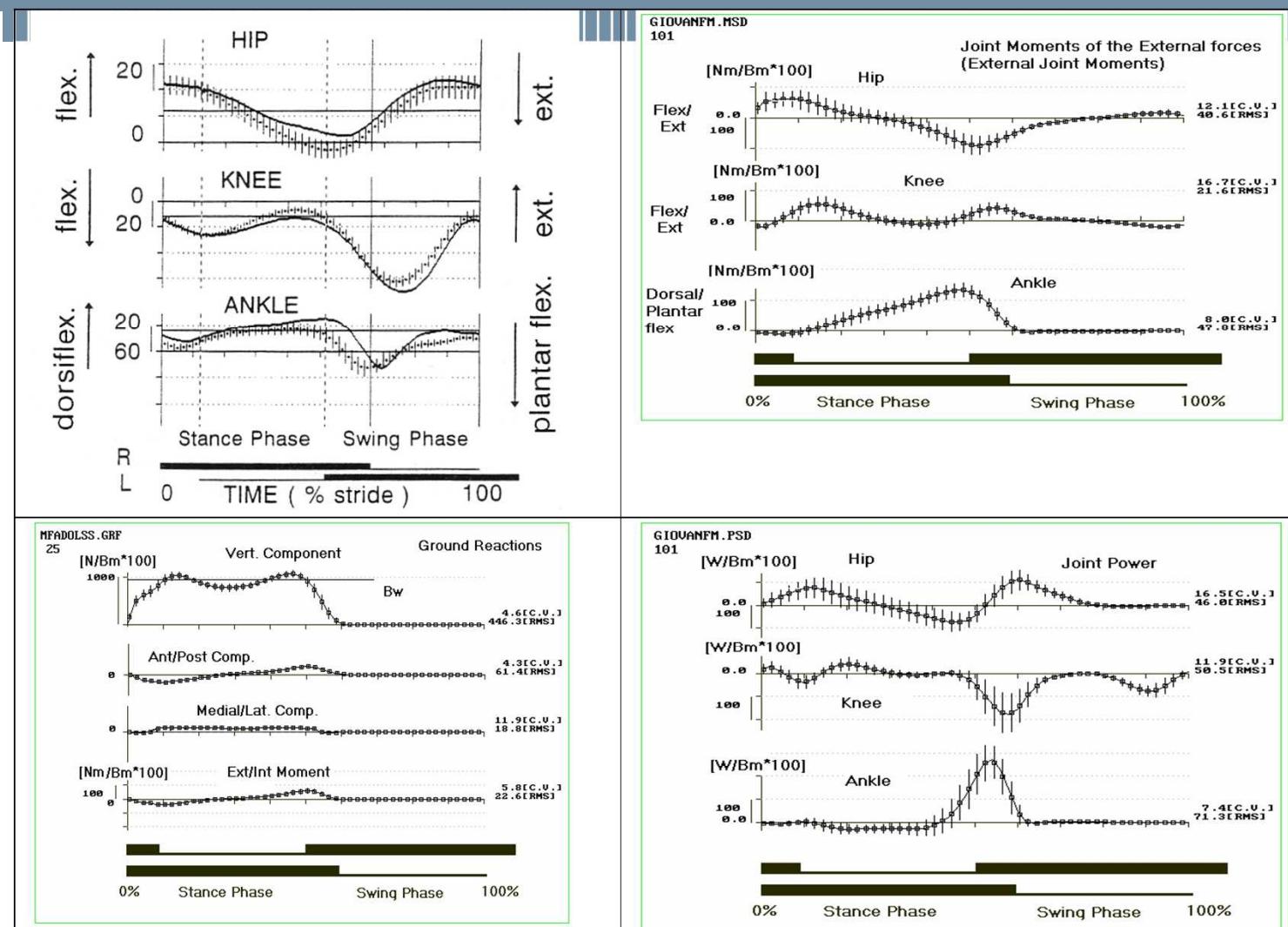
- **MOMENTI ARTICOLARI**

L'insieme delle forze che agiscono sul sistema è costituito da: forze di gravità, forze di inerzia e forze di reazione al terreno. I momenti che questi tre tipi di forze esercitano sulle articolazioni, sommati al momento d'inerzia dovuto alle accelerazioni angolari di ciascun segmento corporeo, costituiscono i momenti dinamici totali esterni

- **POTENZA DELLE ARTICOLAZIONI**

Le potenze alle articolazioni evidenziano le fasi in cui viene prodotta energia e quelle in cui l'energia viene assorbita.

$$P(t) = M(t) * \omega(t)$$



Problematiche tecniche

- 1) Artefatti da movimento di pelle
- 2) Modellizzazione del sistema scheletro-articolare.
- 3) Modalità di prelievo del dato.

Effetto degli errori di stima di anca e ginocchio

10 mm variation

	Flex/Ext	Add/Abd	Int/Ext Rot
Hip Joint angles (deg)			
Max diff	1.5	1.5	7.7
(% of range)	4.1	8.9	56.6
Hip Joint Moments (Nm)			
Max diff	5.2	5.5	0.8
(% of range)	8.5	10.2	4.0
Knee Joint angles			
Max diff (deg)	1.5	1.5	10.9
(% of range)	3.9	9.3	58.0
Knee Joint Moments (Nm)			
Max diff (deg)	5.9	5.9	1.0
(% of range)	15.0	19.7	11.6

Stima di parametri inerziali:

Massa

Posizione del Baricentro

Momenti principali d'inerzia

Vari metodi:

1) misura sperimentale

2) modelli geometrici e stima densità
dei tessuti

3) Uso di equazioni di regressione

