

L'analisi quantitativa del movimento: strumenti, metodi e applicazioni

Ing. Maurizio Ferrarin, PhD

Centro di Bioingegneria FDG
Fondazione Don Carlo Gnocchi Onlus IRCCS
Milano




L'analisi del movimento umano

E' l'insieme di tecniche che permette la **valutazione** del movimento umano e delle sue alterazioni al fine di:

- aiutare nella **diagnosi funzionale** di disordini motori,
- impostare e valutare una **terapia** (riabilitativa, chirurgica, ortesica, ...),
- effettuare **ricerche** sulla fisiologia/patologia del movimento,
- sviluppare **nuovi dispositivi** (protesi, FES, ...),
- ottimizzare il **gesto atletico**,
- progettare oggetti/ambienti **ergonomici**, ...

<u>Valutazione</u>	soggettiva	oggettiva
qualitativa	Descrizione basata sull'osservazione	Ripresa video
quantitativa	Scale di valutazione (Barthel, FIM, Borg, ...)	Valutazione strumentale

Analisi del Movimento: componenti significative

- **Cinematica:** *quanto* si muove ?
 Dati: posizione/movimento/velocità/accelerazione dei segmenti anatomici e delle articolazioni
- **Dinamica:** *perché* si muove ?
 Dati: forze (esterne/interne), momenti e potenze articolari
- **Elettromiografia cinesiologica:** *quando e quanto* i muscoli sono attivi ?
 Dati: segnali elettromiografici

Analisi quantitativa strumentale

Basata su: 1) strumenti di acquisizione
 2) modelli per il calcolo di variabili non misurabili

Strumenti	Variabili misurate
Sistemi optoelettronici	coordinate 3D punti anatomici
Piattaforme dinamometriche	forze di reazione al terreno
Elettromiografi	potenziali mioelettrici





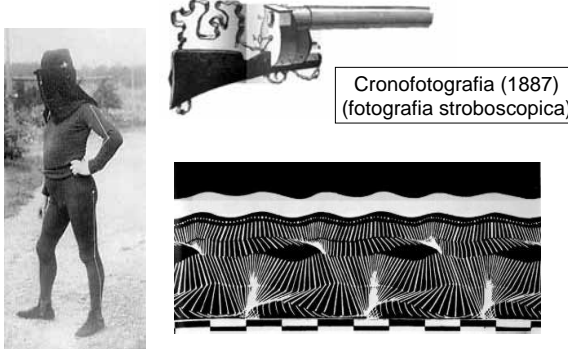
Strumenti per la misura di variabili cinematiche : i sistemi optoelettronici

Registrazione del movimento (fotografia a shutter aperto)

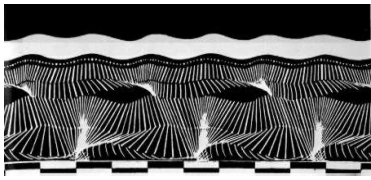



Bruno Munari
Pablo Picasso

Etienne-Jules Marey (Francia, 1830-1904)

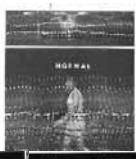


Cronofotografia (1887)
(fotografia stroboscopica)

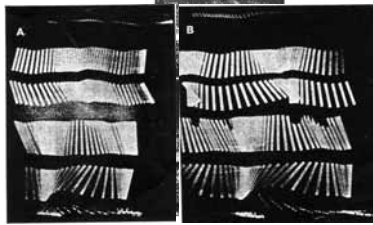


Applicazioni della fotografia stroboscopica

Murray MP et al., "Walking pattern of normal men", *J Bone Jt Surg*, 46: 335-360, 1964



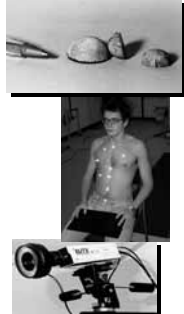
Knutson et al., "Quantitative effects of L-dopa in Parkinsonian gait", *Scand J Rehab Med*, 3(3):121-30, 1971.



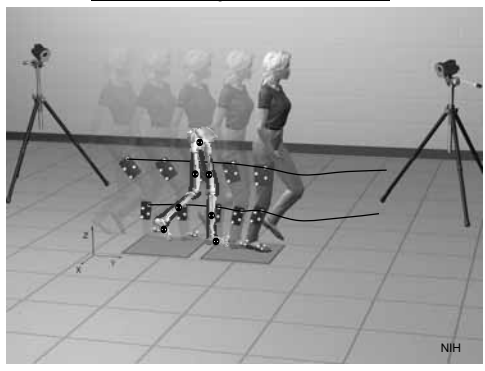
Before L-dopa After L-dopa

Sistemi optoelettronici

- Basati su telecamere all'infrarosso che rilevano marcatori passivi di piccole dimensioni
- Posizionamento di tali marcatori su reperi anatomici
- Riconoscimento automatico della loro presenza e posizione nello scenario ripreso da diverse telecamere
- Ricostruzione della posizione 3D mediante algoritmi di stereofotogrammetria



Sistemi optoelettronici

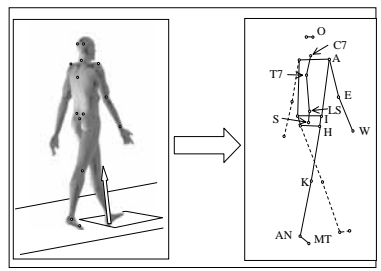


NIH

Sistemi optoelettronici: elaborazione dei dati acquisiti

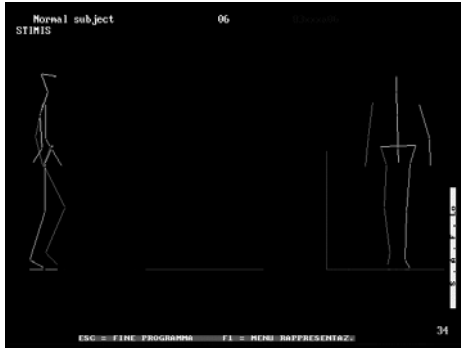
```

    graph LR
      A[Posizione marcatori esterni] --> B[Modelli biomeccanici]
      B --> C[Calcolo punti anatomici interni (centri articolari)]
      C --> D[Calcolo cinematica articolare]
      E[Misure antropometriche] --> B
  
```



Sistemi optoelettronici

Animazione dati acquisiti: Stick Diagram



ESC - FINE PROGRAMMI FE - FINE RAPPRESENTAZIONE

Protocolli di posizionamento marcatori

Analisi dinamica della scoliosi

Analisi pletismografica

Analisi spinta in carrozzina

Analisi gesti complessi

Strumenti per la misura di variabili dinamiche

Principio di Azione e Reazione:

ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria $F = R$

Reazione al terreno (GRF)

E' un vettore caratterizzato da: modulo, direzione, verso, e punto di applicazione

Piattaforma dinamometrica

E' dotata di sensori di forza (piezo-elettrici o a strain-gauge) nei 4 vertici, da cui è possibile ricavare la reazione al terreno

Reazione al terreno

Diagramma vettoriale

Traiettoria del CoP (Centro di Pressione)

Componenti della reazione al terreno

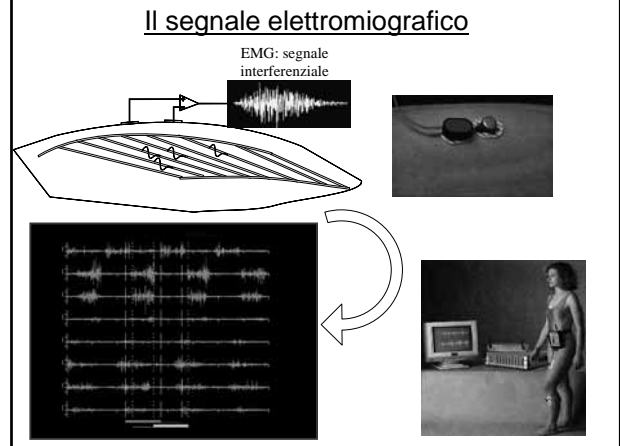
Verticale

Antero-post

Medio-laterale

% stride cycle

Strumenti per la misura dei segnali elettromiografici



Aspetti critici dell'EMG

- configurazione degli elettrodi (dimensioni, distanza, ...)
- posizionamento degli elettrodi
 - qualità del segnale
 - selettività
- pre e post-elaborazione del segnale
- normalizzazione

Raccomandazioni Europee per l'EMG di superficie:



Surface Electromyography for the Non-Invasive Assessment of Muscles

<http://www.seniam.org/>

Movimento umano

Analisi quantitativa

Strumentazione

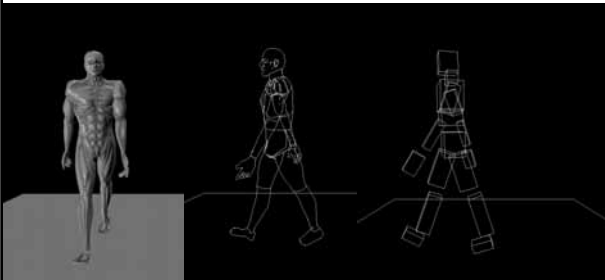
Rilevazione delle variabili misurabili: posizione punti anatomici, forze, EMG

Modelli

Calcolo delle variabili non direttamente misurabili: angoli, momenti articolari, ...

Ipotesi di base dell'analisi del movimento

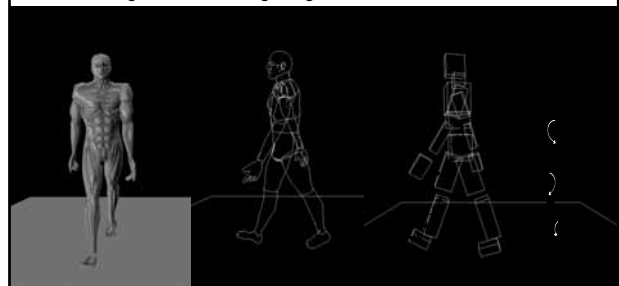
Il corpo umano è un sistema composto da segmenti rigidi (segmenti corporei), vincolati mutuamente fra loro tramite le articolazioni.

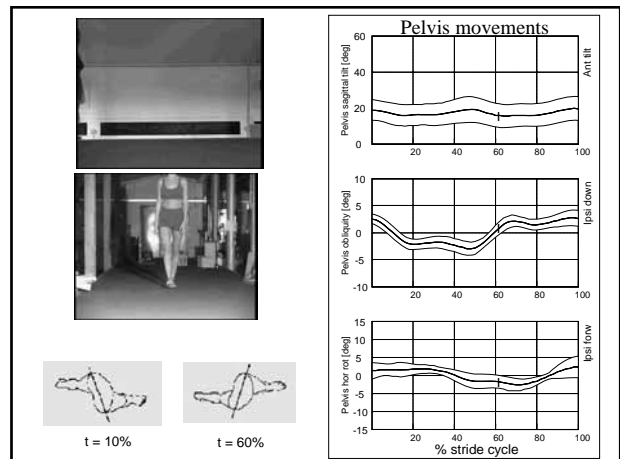
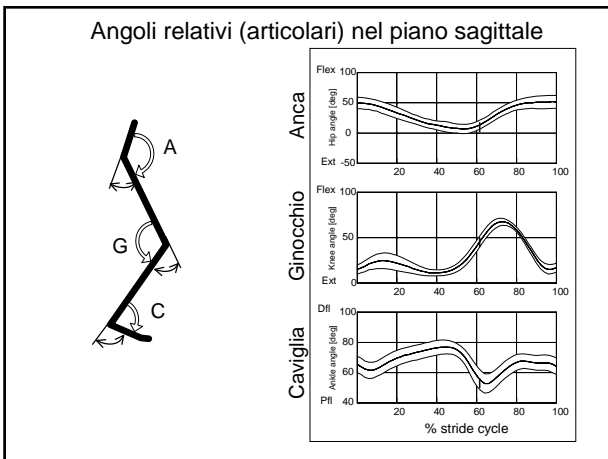


- 1) Modelli per la cinematica articolare: angoli art. e orient. segmenti
- 2) Modelli per la dinamica articolare: momenti e potenze articolari

1) Calcolo angoli articolari

- associazione di un sistema di riferimento locale (assi cartesiani) ad ogni segmento anatomico
- misura del movimento dei sistemi di riferimento locali tramite i marcatori esterni
- calcolo trigonometrico degli angoli articolari





2) Modelli per la dinamica articolare

Il sistema multisegmentale umano è sottoposto a forze esterne (reazioni vincolari) e interne (forze muscolari)

Questo sistema è sottoposto alla forza di gravità e alle forze/momenti d'inerzia

Come schematizzare l'effetto meccanico di N muscoli ?

L'insieme delle azioni dei muscoli e dei tessuti passivi (tessuti molli, legamenti) che agiscono su una articolazione, determinano un **momento articolare interno (estensorio/flessorio)**

Cos'è il momento di una forza?

E' la misura dell'effetto rotatorio della forza rispetto ad un punto

$M = F \times b$ [Nm]

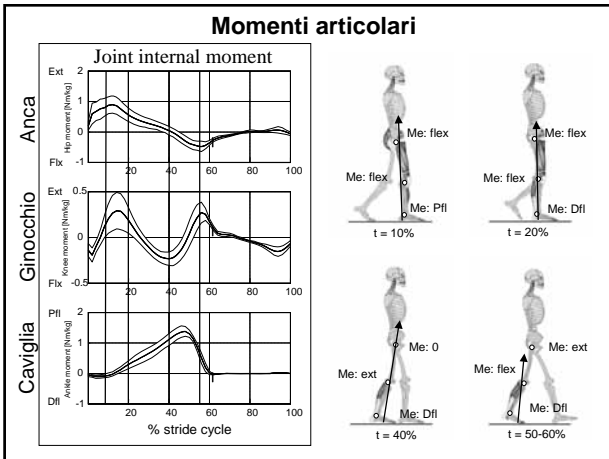
$M_1 = M_2 \rightarrow F_1 \times b_1 = F_2 \times b_2$

$M_B = F_B \times b_B$
 $M_P = F_P \times b_P$

Il momento interno equilibra dinamicamente il **momento esterno** (di segno opposto), dovuto alle altre componenti: forza di gravità, forze inerziali, reazioni vincolari

$$\begin{cases} \Sigma F_p + \Sigma R = m a_p \\ \Sigma M_c + \Sigma M_r = I_p \alpha_p \end{cases}$$

Le **equazioni della dinamica** permettono di calcolare i momenti articolari esterni (non misurabili) partendo da **grandezze misurabili** (reazione al terreno, movimento dei segmenti anatomici) e da **parametri stimati** (parametri antropometrici)



Lavoro muscolare e potenze articolari

- Definizione di lavoro meccanico (Joule)**
Nei movimenti traslatori: Lavoro = Forza x spostamento
Nei movimenti rotatori: Lavoro = Momento x rotazione angolare

$$L_m = M_{int} \times \alpha$$

- Definizione di potenza meccanica (Watt)**
Energia prodotta/consumata nell'unità di tempo: P = L / t = F x s / t = F x v
Nei movimenti traslatori: P = Forza x velocità lineare
Nei movimenti rotatori: P = Momento x velocità angolare

$$P_m = M_{int} \times \omega$$

Potenze articolari

$P_m = M_{int} \times \omega$

Nel cammino si alternano fasi di produzione (P>0) e fasi di assorbimento (P<0) di energia nelle tre articolazioni.

Potenza nulla: articolazione non in movimento, oppure momento nullo

P < 0
movimento articolare opposto al momento interno

P > 0
movimento articolare concorde con il momento interno:
- contrazione muscolare concentrica

Anca
Hip power (W/kg)
Gen 4
2
0
-2
-4
Ass
20 40 60 80 100

Ginocchio
Knee power (W/kg)
Gen 1
0
-1
-2
-3
Ass
20 40 60 80 100

Caviglia
Ankle power (W/kg)
Gen 4
2
0
-2
-4
Ass
20 40 60 80 100

M_{int} ext
Gin sta flettendo

Tric Sur attivo
M_{int} Pfl
Cav flette plant



SAFL0 – Servizio di Analisi della Funzionalità Locomotoria

IRCCS S. Maria Nascente, Milano – Fond. Don Carlo Gnocchi
safl0@dongnocchi.it

Traiettorie marcatori

Reazioni al terreno

Attività elettrica muscoli

Esempio di report

SAFL0 - Servizio di Analisi della Funzionalità Locomotoria
Fondazione Don Carlo Gnocchi
IRCCS S. Maria Nascente

ANALISI DEI DATI

PARAMETRI GENERALI

ATTIVITÀ FUNZIONALI

LA FASE DELLA MARCIA (WALK) viene preparata al computer. È costituito da un insieme di dati che descrivono il movimento del corpo umano in termini di posizione, velocità e accelerazione.

IL SISTEMA DI ANALISI DEI DATI (SAFL0) viene utilizzato per analizzare i dati raccolti durante il movimento.

IL SISTEMA DI ANALISI DEI DATI (SAFL0) viene utilizzato per analizzare i dati raccolti durante il movimento.

IL SISTEMA DI ANALISI DEI DATI (SAFL0) viene utilizzato per analizzare i dati raccolti durante il movimento.

Utilità della gait analysis nelle PCI

1. Impostazione del trattamento terapeutico/riabilitativo

Identificazione dei fattori patogenetici (Crenna, 1998):

- Paralisi: deficit di reclutamento
- Co-contrazioni: reclutamento simultaneo di muscoli antagonisti (non fisiologico)
- Spasticità: ipereccitabilità del riflesso da stiramento
- Componenti non-neurali: modifiche delle proprietà meccaniche del sistema osteo-muscolo-tendineo

Utilità della gait analysis nelle PCI

1. Impostazione del trattamento terapeutico/riabilitativo

2. Follow up del paziente:

- Verifica efficacia del trattamento terapeutico/riabilitativo (chirurgico, farmacologico, stimolazione elettrica, ...)
- Valutazione dell'evoluzione del quadro clinico
- Scelta/ottimizzazione del supporto ortesico

Utilità della gait analysis nelle PCI

1. Impostazione del trattamento terapeutico/riabilitativo

2. Follow up del paziente:

3. Studi di gruppo

- Descrivere/classificare le alterazioni del cammino nelle PCI (Tylkowski et al., 1991; Hoffinger et al., 1993; Sojka et al., 1995; Hullin et al., 1996; Delp et al., 1996; Kelly et al., 1997; Crenna, 1998; Galli, Fazzi et al., 1999; Damiano et al., 2000; Crenna et al., 2005; ...)
- Valutare l'efficacia di diversi trattamenti terapeutico/riabilitativi (chirurgia, botox, ortesi, FES, ...)

Utilità della gait analysis nelle PCI

Benefici nell'uso della Gait Analysis per l'indicazione di chirurgia funzionale:

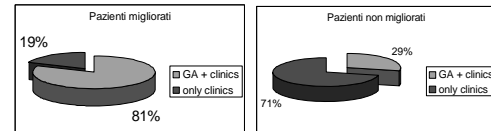
Lee et al., Arch Pys Med Rehab, 1992

23 bambini PCI diplegici con indicazione di chirurgia funzionale:

- gruppo (a): 15 pz operati sulla base sia della valutazione clinica che dei risultati della gait analysis
- gruppo (b): 8 pz operati sulla base solo della valutazione clinica

Risultati analisi postoperatoria (follow up a 1 anno):

- 16 migliorati (param sp. temp., pattern angolari e EMG): 13 a, 3 b
- 7 non migliorati: 2 gruppo a, 5 gruppo b



Ruolo dell'AM nel campo delle ortesi

Fornire datai quantitativi per:

- sviluppare nuove ortesi / ottimizzare quelli esistenti
- adattare l'ortesi alle caratteristiche del singolo soggetto
- verificarne l'uso corretto / monitorare le performance del pz
 - confrontare diverse soluzioni ortesiche

Vedremo alcuni esempi di AM nella:

- progettazione nuove ortesi HKAFO
- gait analysis di pz. paraplegico con ortesi AFO
- analisi degli effetti di splint nella distonia focale

Esempio 1

Studio degli effetti della rotazione orizzontale dell'articolazione d'anca nella Reciprocating Gait Orthosis


Ferrarin M.*, Rabuffetti M.*, Lusvardi M.#

* Centro di Bioingegneria FDG, Don Gnocchi Found., Milano, Italy

Rizzoli Orthopaedic Workshop, Bologna, Italy

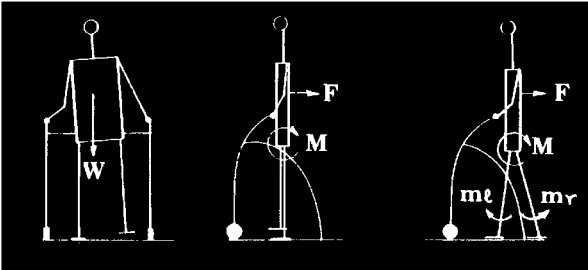
RGO - Reciprocating Gait Orthosis

- Sviluppata presso la LSU (New Orleans, 1983) per bambini con spina bifida
- Costituita da:
 - aste in alluminio
 - valve in polipropilene con inserti in fibra di carbonio
 - articolazione d'anca 1 g.d.l. con meccanismo reciprocatore
 - AFO in polipropilene
- Cammino con deamb/stampelle



Centro di Bioingegneria - FDG
Fondazione Don Carlo Gnocchi - Onlus
IRCCS "S. Maria Nascente", Milano

RGO - Modalità di cammino

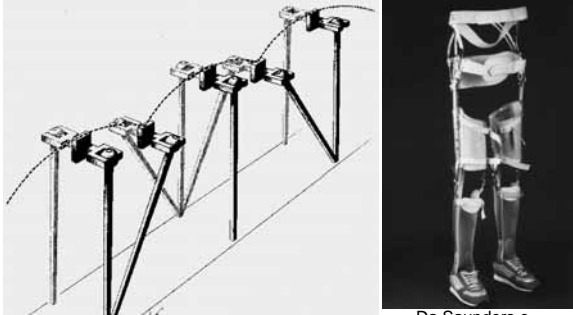


- Spostamento laterale del peso sull'arto in posizione avanzata
- Estensione tronco - fase di volo - riposizionamento deambulat.

Centro di Bioingegneria - FDG
Fondazione Don Carlo Gnocchi - Onlus
IRCCS "S. Maria Nascente", Milano

Cammino con RGO

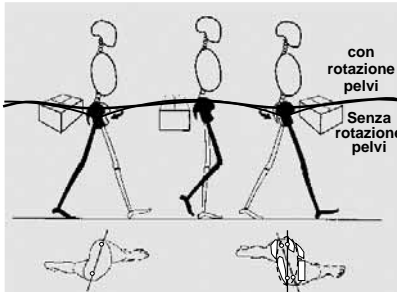
Cammino bipede con gambe rigide e senza rotazione del bacino



Da Saunders e coll., 1953

Centro di Bioingegneria - FDG
Fondazione Don Carlo Gnocchi - Onlus
IRCCS "S. Maria Nascente", Milano

Cammino normale: rotazione del bacino



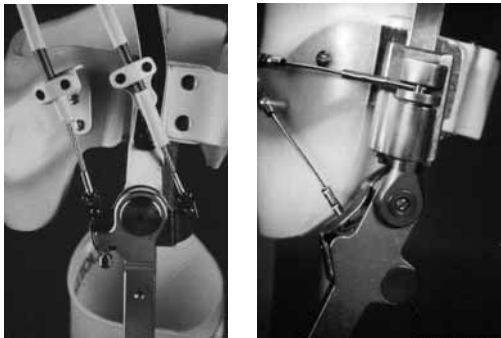
Modificato da Perry, 1992

- riduzione del range di flex/ext dell'anca a parità di lungn del passo
- riduzione dell'escursione verticale del centro di massa (CoM)
- riduzione delle forze necessarie per modificare la direz. del CoM

Centro di Bioingegneria - FDG
Fondazione Don Carlo Gnocchi - Onlus
IRCCS "S. Maria Nascente", Milano

Articolazione d'anca a 2 gdl: R²GO

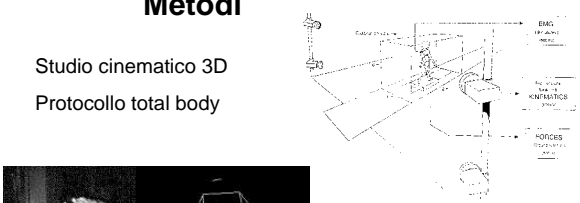
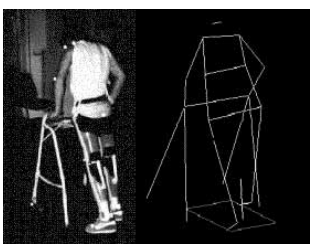
Flessione/estensione Flessione/estensione + rotazione esterna/interna



FDG
Fondazione Don Carlo Gnocchi - Onlus
IRCCS "S. Maria Nascente", Milano

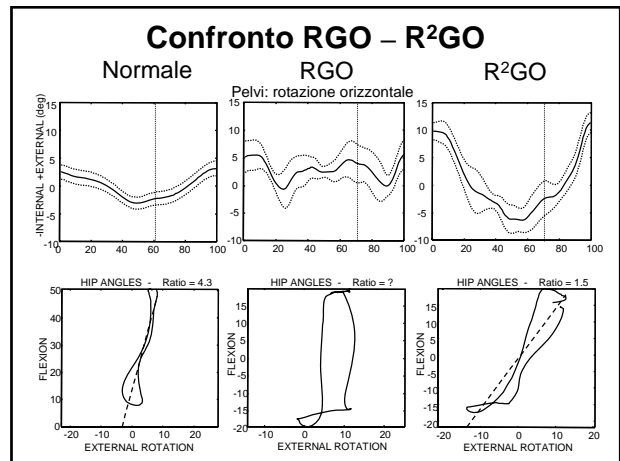
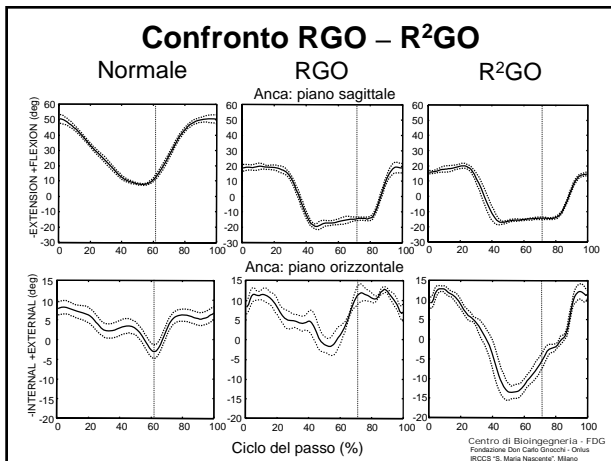
Metodi

Studio cinematico 3D
Protocollo total body

- Maschio, 22 anni, paraplegia completa, lesione spinale T5
- Utente RGO esperto (>3 anni)
- Cammino con RGO e R²GO
- Nessuna differenza significativa nei parametri spazio-temporali del cammino
- V = 0.4 m/s

FDG
Fondazione Don Carlo Gnocchi - Onlus
IRCCS "S. Maria Nascente", Milano



Confronto RGO - R²GO

Conclusioni

La rotazione trasversale dell'anca migliora il cammino di soggetti paraplegici con ortesi RGO perché:

- permette la rotazione orizzontale del bacino
- correla i movimenti sagittali e trasversali dell'anca
- riduce l'escursione verticale del COM

Il rapporto fra rotazione sagittale e trasversale dell'articolazione d'anca deve essere ottimizzato (aumentato)

r2godemobat

Esempio 2

Gait analysis di un paziente paraplegico che utilizza ortesi AFO (Vannini-Rizzoli boots)

Ferrarin M.*, Vannini A.#, Rabuffetti M.*, Pedotti A.°

* Centro di Bioingegneria FDG, Don Gnocchi Found., Milano, Italy
Montecatone Rehabilitation Institute, Imola, Italy
° Dipartimento di Bioingegneria, Politecnico di Milano, Italy

3D Walking pattern (Stick Diagram)

Paraplegic patient (T12) using Vannini-Rizzoli (AFO) boots

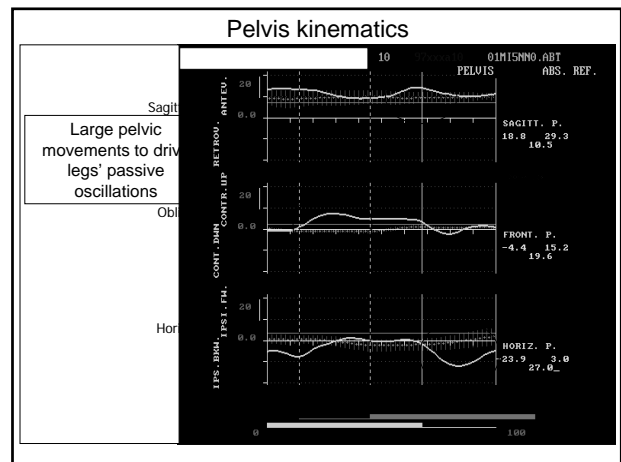
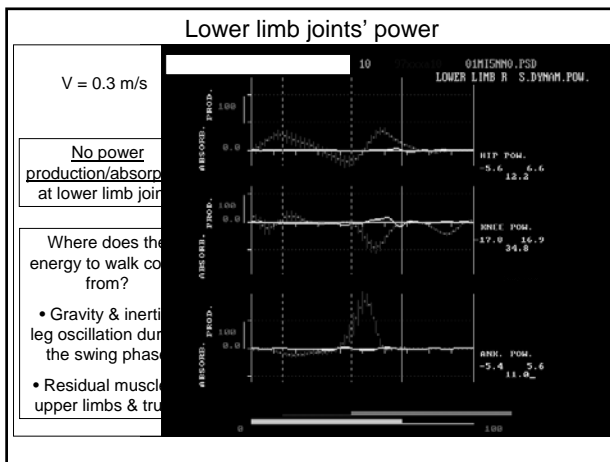
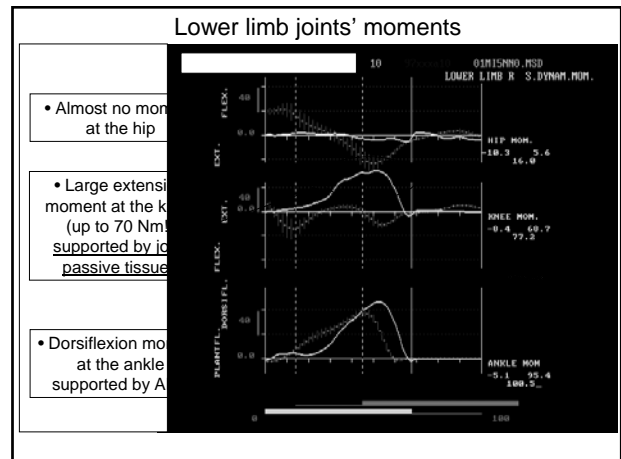
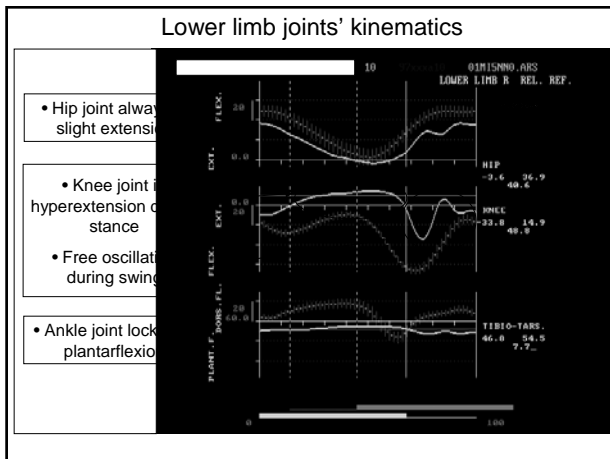
Standing posture

Normal subject

Paraplegic patient with AFO boots

Knee hyperextension

To avoid joints' collapse GRF must be in front of the knee and behind the hip



Analisi degli effetti funzionali di splint nella distonia focale: il crampo del musicista

La distonia focale (crampo del musicista) è una sindrome caratterizzata da involontarie e simultanee co-contrazioni di muscoli agonisti e antagonisti, che limita la velocità, destrezza e coordinazione nell'esecuzione di specifici movimenti (o pezzi musicali). E' altamente invalidante e può determinare la fine della carriera concertistica. (Incidenza: 1 su 500; dall'8 al 14% delle patologie profes.)

Opzioni terapeutiche :
 - Rieducazione al gesto
 - Tossina botulinica
 - Splint

Case study

- Pianista professionista, anni 42
- Distonia focale alle dita della mano destra (insorgenza sul 2° dito, poi coinvolgimento del 1° e 3°)
- Trattamento mediante splint su 1°, 2° e 3° dito
- Protocollo sperimentale: esecuzione di scale con entrambe le mani "ad aprire" e "a chiudere", velocità di esecuzione 448 note/minuto

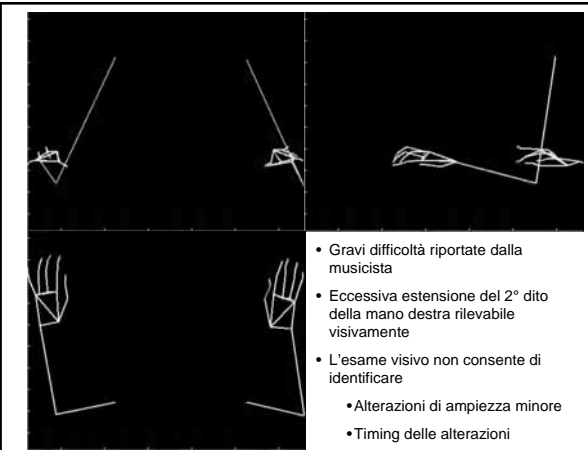
Protocollo pianisti: aspetti tecnici



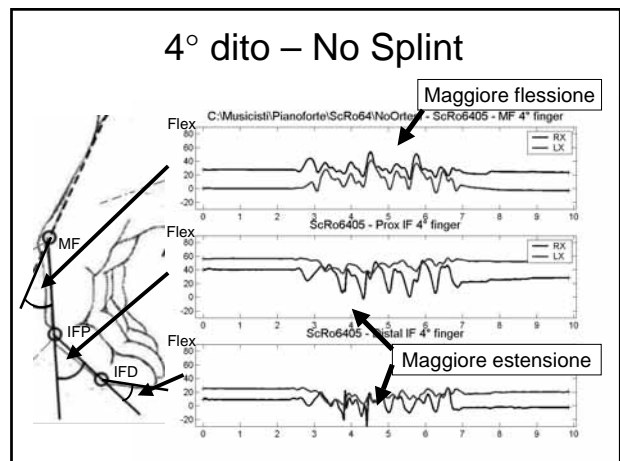
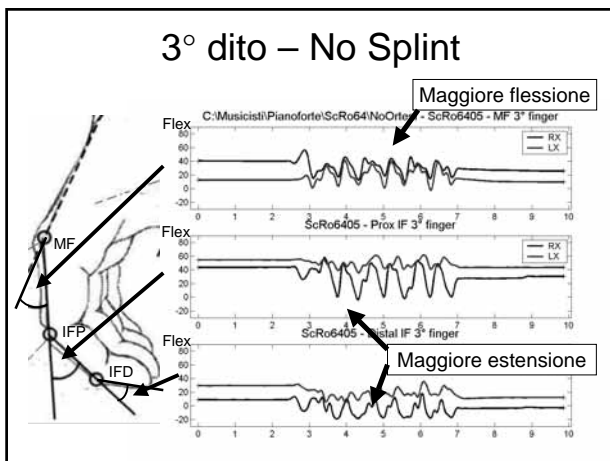
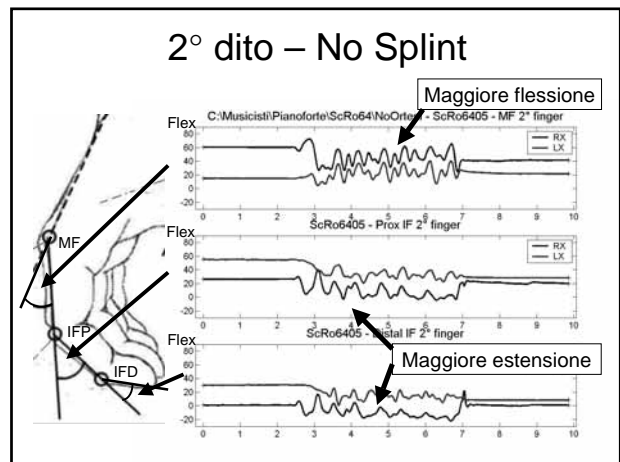
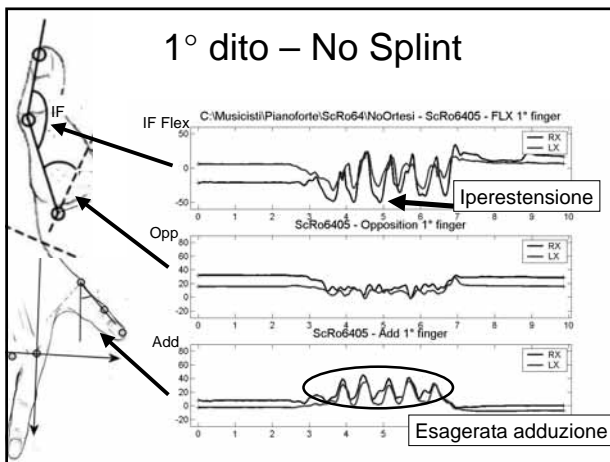
23 marcatori per arto: 19 mano, 2 polso, 1 gomito, 1 spalla

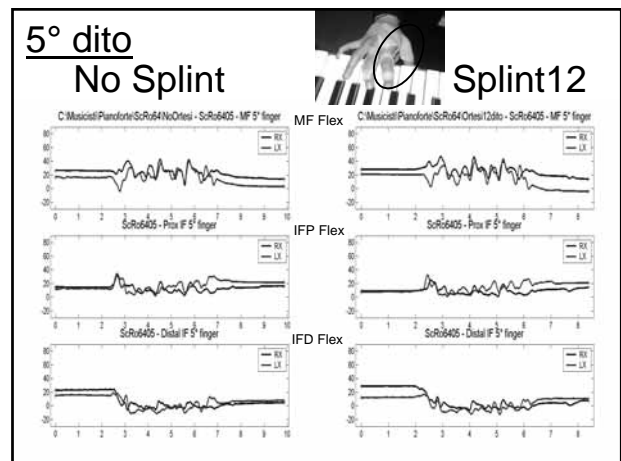
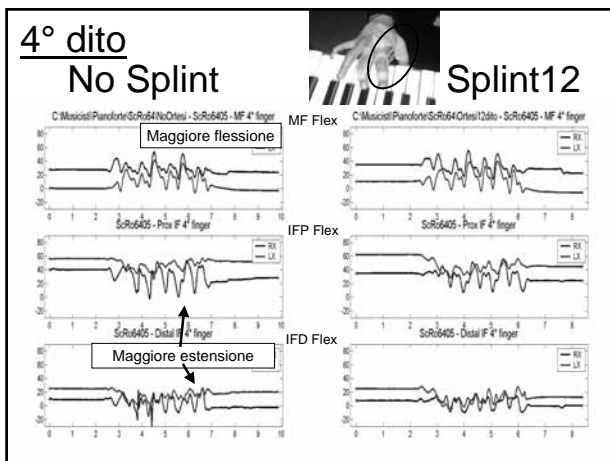
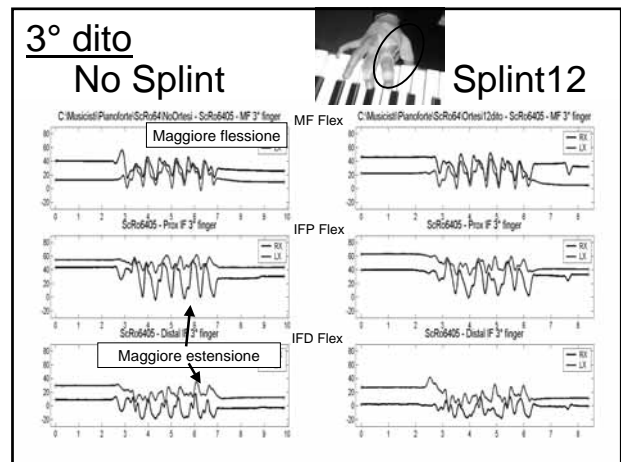
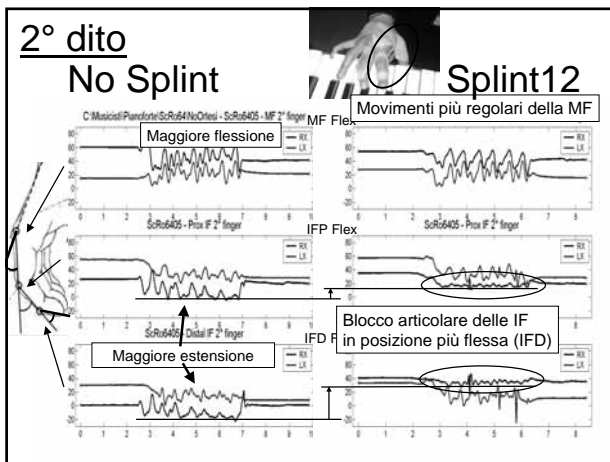
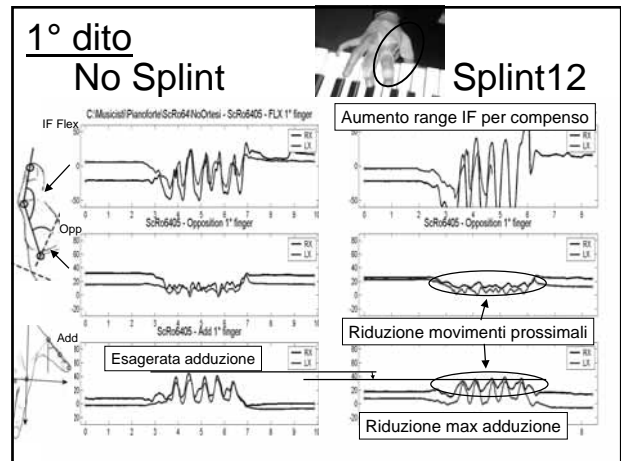
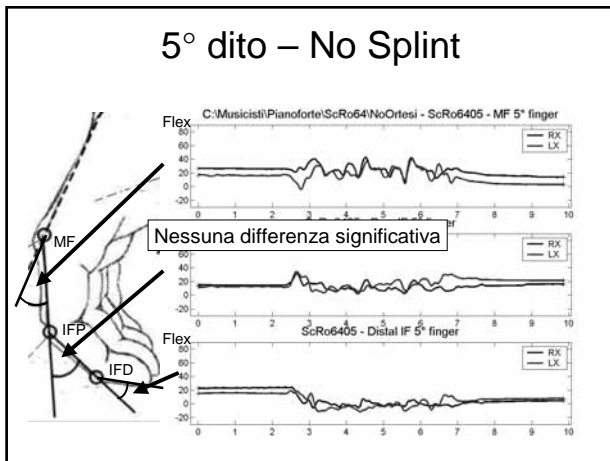
sEMG 3 canali per arto: muscoli flessori (radiale e ulnare) ed estensori di polso e dita

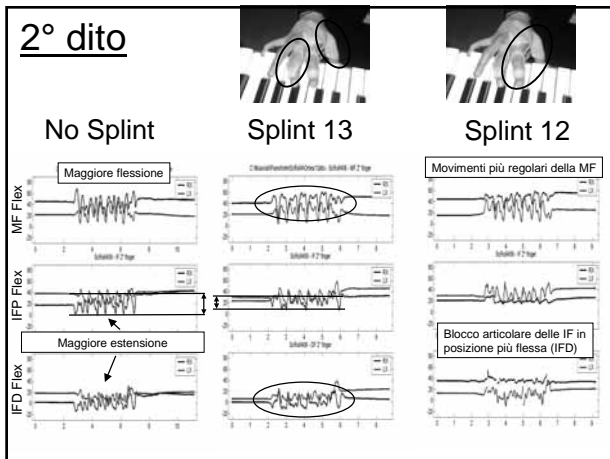
Variabili: - fl/ext MCF (2,3,4,5 dito)
 - fl/ext IF prox-dist (2,3,4,5 dito)
 - fl/ext IF, abd/add, opp (pollice)



- Gravi difficoltà riportate dalla musicista
- Eccessiva estensione del 2° dito della mano destra rilevabile visivamente
- L'esame visivo non consente di identificare
 - Alterazioni di ampiezza minore
 - Timing delle alterazioni







Conclusioni

L'Analisi del movimento nella distonia focale consente di:

- quantificare alterazioni visibili clinicamente
- evidenziare alterazioni non visibili clinicamente (perchè limitate in ampiezza o nel tempo)
- quantificare gli effetti diretti e indiretti (compensi, effetti su altri distretti) di supporti ortesici e splint

Fondazione Don Carlo Gnocchi Onlus Centro di Bioingegneria FDG

grazie per l'attenzione !

Per ulteriori informazioni:
www.cbi.dongnocchi.it
mferrarin@cbi.dongnocchi.it