

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

Sviluppo del cammino durante la crescita: confronto tra
variabilità segmentale e variabilità del centro di massa

Elaborato in
BIOMECCANICA

Relatore

Prof.ssa Rita Stagni

Presentata da

Stefano Di Paolo

Correlatore

Prof.ssa Maria Cristina Bisi

Sessione II

Anno Accademico 2014-2015

INDICE

| | |
|---|-----------|
| Capitolo 1: Introduzione..... | 7 |
| 1.1 Il ciclo del cammino..... | 7 |
| 1.2 Revisione della letteratura riguardante lo sviluppo del cammino durante l'infanzia..... | 9 |
| 1.2.1 L'inizio del cammino..... | 10 |
| 1.2.2 Il pendolo inverso..... | 10 |
| 1.2.3 La variabilità dei parametri..... | 11 |
| 1.2.4 Ridondanza e ripetibilità..... | 14 |
| 1.2.5 Gli studi più recenti..... | 14 |
| 1.3 Scopo dell'elaborato..... | 15 |
| 1.3.1 Modalità di valutazione..... | 16 |
| Capitolo 2: Materiali e metodi..... | 18 |
| 2.1 Soggetti..... | 18 |
| 2.2 Test..... | 18 |
| 2.3 Equipaggiamento e procedura sperimentale..... | 19 |
| 2.3.1 BTS Smart-DX Italia..... | 19 |
| 2.3.2 Protocollo Davis..... | 22 |
| 2.3.3 Riprese a video..... | 24 |
| 2.4 Analisi dei dati..... | 24 |
| 2.4.1 Tracking..... | 24 |
| 2.4.2 Elaborazione dei dati..... | 25 |
| 2.4.3 Verifica validità angoli e marker..... | 26 |
| 2.4.4 Stima centro di massa..... | 27 |
| 2.4.5 Analisi variabilità..... | 27 |
| 2.5 Analisi statistica..... | 29 |
| Capitolo 3: Risultati..... | 33 |
| 3.1 Inter-subject..... | 34 |
| 3.2 Intra-subject..... | 46 |
| 3.3 Inter-test..... | 60 |
| Capitolo 4: Discussione..... | 76 |
| 4.1 Conclusione e sviluppi futuri..... | 77 |
| Riferimenti Bibliografici..... | 79 |

ABSTRACT

In letteratura è noto che la variabilità cinematica dei bambini durante il cammino è molto maggiore se confrontata con quella di soggetti adulti. Ciò rende difficile definire lo sviluppo del cammino basandosi sull'analisi di angoli articolari. In questo lavoro è stata valutata la traiettoria del centro di massa come possibile fattore caratterizzante la maturazione del cammino durante la crescita: l'ipotesi è che questa risulti, nei bambini, più ripetibile rispetto al pattern degli angoli articolari. È stata analizzata la cinematica del cammino di soggetti appartenenti a tre fasce di età differenti (4 anni, 6 anni, giovani adulti), mediante un sistema di stereofotogrammetria e marker riflettenti (protocollo Plug-in Gait). Lo studio è stato condotto avvalendosi di software per l'acquisizione, l'elaborazione (BTS Smart-DX) e l'analisi statistica (SPM1D) dei parametri d'interesse. La variabilità è stata analizzata secondo tre diverse modalità (Inter-subject, Intra-subject, Inter-test). È stato osservato un trend simile in termini di variabilità del centro di massa tra bambini e adulti. La variabilità cinematica degli angoli articolari è invece risultata più alta nei bambini, in maniera significativa per tutte e tre le modalità citate. L'ipotesi è stata confermata per i soggetti che hanno preso parte allo studio: i bambini, pur avendo raggiunto un relativo sviluppo del cammino, presentano una variabilità segmentale maggiore di quella degli adulti, mentre la variabilità della traiettoria del centro di massa è risultata essere simile a quella dei soggetti maturi.

PAROLE CHIAVE

maturazione del cammino, variabilità del cammino, traiettoria del centro di massa

Capitolo 1: Introduzione

Lo studio della biomeccanica del cammino ha costituito, negli ultimi anni, uno dei punti cardine della ricerca in ambito biomedicale. Le applicazioni ed i risvolti raggiungibili in termini di analisi, prevenzione e riabilitazione motoria di soggetti nelle differenti fasi della vita lo rendono appetibile ed implicabile sia in ambito terapeutico che sportivo.

La valutazione clinica del cammino viene effettuata attraverso un'analisi osservazionale e strumentale dei segmenti articolari, durante le singole fasi del ciclo del passo. L'analisi del passo può variare dalla semplice osservazione dei pattern di camminata del paziente fino ad uno studio computerizzato 3D del moto (Perry, 1992), che sfrutta i sistemi di motion capture per la riproduzione a video. Questo consente di ottenere informazioni quantitative e qualitative sulle caratteristiche ed i meccanismi della deambulazione. Nel presente lavoro di tesi è stato utilizzato un sistema ottico di motion capture a marker passivi, che ha consentito un'analisi real-time, non invasiva e ad alta definizione delle varie attività sostenute dai soggetti presi in considerazione per lo studio.

1.1 Il ciclo del cammino

Si definisce *Passo* o *Ciclo del cammino* (fig.1) l'intervallo di tempo tra due successivi istanti di contatto con il terreno dello stesso piede (di solito il contatto del tallone).

Il passo si divide in una fase di appoggio e una fase di oscillazione:

- La fase di appoggio (Stance phase) è il periodo in cui il piede è in contatto con il pavimento. Inizia convenzionalmente con il contatto iniziale del tallone e finisce con il distacco delle dita (nell'adulto sano è di circa il 60% dell'intero ciclo);
- La fase di oscillazione (Swing phase) è il periodo di tempo in cui il piede non è in contatto con il pavimento (nell'adulto sano è di circa il 40% dell'intero ciclo).

La fase di appoggio può essere suddivisa a sua volta in tre intervalli:

- Il doppio appoggio iniziale che costituisce l'inizio del ciclo del passo. Rappresenta il tempo in cui entrambi i piedi si trovano a contatto con il suolo dopo il contatto iniziale;
- L'appoggio singolo che ha inizio quando il piede opposto si stacca per l'oscillazione;
- Il doppio appoggio terminale che ha inizio con il contatto del piede contro laterale e continua finché l'arto che era in appoggio inizialmente si distacca per l'oscillazione.

Per convenzione si definiscono due fasi fondamentali: Heel-Strike (appoggio del tallone) è l'istante iniziale in cui il piede è in contatto con il pavimento, Toe-Off (distacco delle punte) è invece la fase in cui il piede termina il contatto con il pavimento.

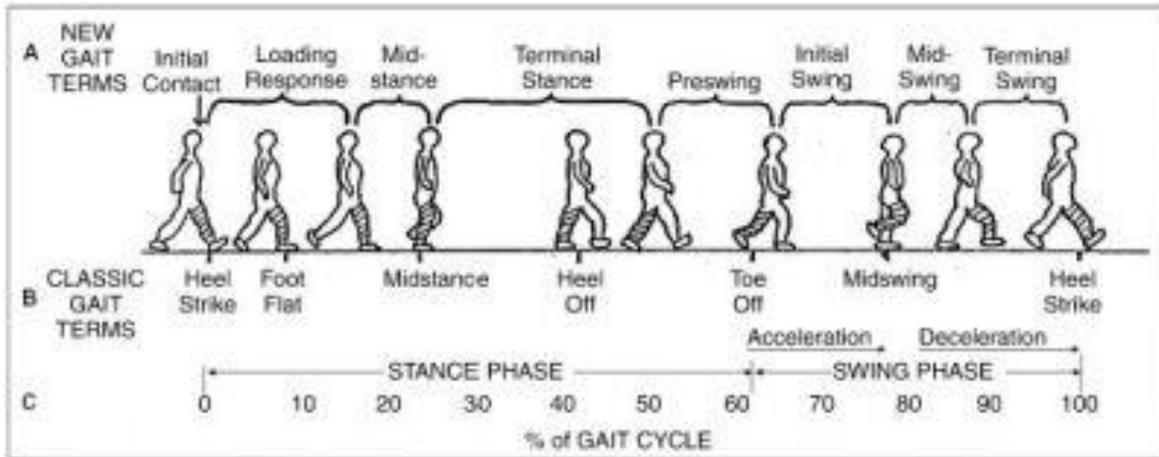


Figura 1 - Ciclo del cammino

Si possono identificare altri parametri importanti, come il “Doppio supporto” (Double support) quando entrambi i piedi sono in contatto con il pavimento (due volte nel ciclo del cammino, all’inizio ed alla fine della fase di appoggio), il “Singolo supporto” (Single support) quando un solo piede è in contatto con il pavimento.

Le fasi di Stance e Swing possono essere ulteriormente suddivise in:

- **Initial contact** – Istante in cui il piede tocca il terreno;
- **Loading response** – Intervallo di tempo che va dall’initial contact al sollevamento dell’arto controlaterale dal suolo, durante il quale il peso viene spostato da un arto all’altro;
- **Mid-stance** – Intervallo di tempo che va dal sollevamento dell’arto controlaterale dal suolo fino all’istante in cui le caviglie di entrambi gli arti sono allineate sul piano frontale;
- **Terminal stance** – Intervallo di tempo che va dall’allineamento delle caviglie sul piano frontale all’initial contact dell’arto controlaterale (swinging);
- **Preswing** – Intervallo di tempo che va dall’initial contact dell’arto controlaterale a pochi istanti prima del sollevamento dell’arto ipsilaterale dal suolo (fase di scarico del peso);
- **Initial swing** – Sollevamento dell’arto dal suolo fino alla posizione di massima flessione del ginocchio;

- **Mid-swing** – Intervallo di tempo che va dalla flessione del ginocchio alla posizione verticale della tibia;
- **Terminal swing** – Fra l'istante in cui la tibia si trova in posizione verticale all'initial contact (Riva e Stagni, 2013).

La lunghezza del passo (Step length) è la distanza tra due appoggi successivi a terra dello stesso tallone: è uguale alla lunghezza del piede più lo spazio percorso in aria. Dipende in gran parte dalla lunghezza degli arti inferiori e dalla velocità del cammino. A velocità normale è pari circa al 90% dell'altezza corporea.

Rispetto al tempo possiamo identificare parametri come la *Velocità* spostamento lineare lungo la direzione di progressione (lunghezza media x frequenza media) e la *Cadenza* numero di passi nell'unità di tempo, l'inverso della durata del ciclo. E' possibile aumentare la velocità sia aumentando la lunghezza del passo che aumentandone la frequenza.

L'analisi del cammino svolta a livello scientifico serve a migliorare le conoscenze di alcuni aspetti del cammino sia in pazienti normali che in quelli patologici. L'applicazione a scopo scientifico si può trovare sia nella ricerca clinica (coinvolge i pazienti e non necessariamente arrecherà beneficio agli stessi, ma ad altri in futuro) e nella ricerca di base (finalizzata ad altre conoscenze).

1.2 Revisione della letteratura riguardante lo sviluppo del cammino durante l'infanzia

Il cammino richiede un particolare controllo neuromotorio che risulta molto complesso da ricostruire artificialmente, essendo influenzato dall'interazione tra allineamento osseo, attività neuromuscolare, angoli articolari e fenomeni della fisica. Tale interazione può essere disturbata da traumi, deformazioni congenite e disturbi della crescita che ne diminuiscono l'efficienza, in particolar modo per quanto concerne l'età infantile. La valutazione dei pattern del cammino dei bambini è alla base di ogni intervento di natura ortopedica o di terapia fisica, poiché fornisce una documentazione adeguata delle principali deviazioni dalla normale attività motoria che, in correlazione ad un accurato giudizio clinico, aiuta a determinare le cause di problemi nella mobilità (Perry, 1992). Studi in letteratura (De Luca et al., 1997) hanno dimostrato un significativo miglioramento in termini di costi e riuscita di interventi in seguito ad una dettagliata analisi cinetica e cinematica di tali parametri, in quei casi dove i fattori che impedivano il corretto andamento motorio non risultavano chiari.

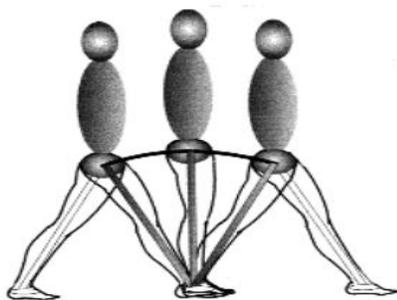
1.2.1 L'inizio del cammino

Il cammino indipendente inizia generalmente attorno al primo anno di età, poiché nei primi sei mesi il corpo attua un processo di integrazione dei vincoli posturali con le necessità dinamiche del movimento. Si è soliti indicare i 14 mesi (Bosh et al., 2007) come tempo mediamente necessario ad un infante affinché la flessione-estensione rudimentale degli arti inferiori possa divenire una vera e propria coordinazione motoria che consenta di stare in piedi e muoversi autonomamente (Dominici et al., 2011).

Superato questo periodo iniziale, si verifica una fase di assestamento, o “tuning”, in cui i parametri del passo tendono a raffinarsi in maniera più precisa (Bisi e Stagni, 2015). È quindi divenuto interesse comune cercare di capire quale o quali fossero i fattori rappresentativi nello sviluppo del cammino.

1.2.2 Il pendolo inverso

La stabilità viene valutata come una minimizzazione delle oscillazioni durante il moto, la quale inizia e si protrae progressivamente dagli arti inferiori ai superiori (Cappozzo, 1981). La dinamica del singolo arto, che rappresenta una struttura cinematica aperta, viene tipicamente assimilata a quella di un *pendolo inverso* (Winter, 2009). Durante la fase di appoggio su una sola gamba, il piede sul pavimento funge da perno attorno al quale la gamba, e tutta la parte superiore del corpo, ruota fino al momento del contatto al suolo dell'altro piede. Quest'ultimo diventa quindi il nuovo pivot per il movimento del tronco (simile, appunto, ad un pendolo inverso) mentre l'altra gamba inizia il suo passo.



Tramite il modello del pendolo è possibile prevedere, attraverso l'angolo e la lunghezza del braccio di leva, quale sarà l'ampiezza del movimento rotatorio. In questo modo si possono attuare paragoni e discriminazioni sulla lunghezza effettiva dello step anche in soggetti che presentano arti di dimensioni differenti (come ad esempio adulti e bambini, o bambini di altezze diverse), normalizzando tali parametri. La normalizzazione viene effettuata

per rendere minimi gli effetti confondenti che le dimensioni corporee o la velocità di andamento possono apportare alla misurazione.

Recenti studi (Bisi e Stagni, 2015) hanno dimostrato che l'andamento del pendolo inverso si manifesta, seppur ancora in forma rudimentale, nei bambini in età molto precoce, ed essendo uno dei primi fattori

a presentarsi nel cammino, potrebbe essere un fattore cardine per la descrizione dello sviluppo motorio e della sua evoluzione dall'infanzia all'età adulta.

1.2.3 La variabilità dei parametri

I parametri che guidano i bambini verso un pattern cinematico assimilabile a quello degli adulti non sono ancora noti alla comunità scientifica, così come non è ben definita l'età oltre la quale la variabilità dei due gruppi diventa conforme.

Sutherland (Sutherland, 1997) ha condotto analisi sui bambini dai primi mesi di cammino fino all'età di 10 anni, riscontrando che i bimbi, quando iniziano a camminare, presentano una cosiddetta "posizione di guardia", con spalle raccolte e gomiti flessi (fig. 2). Il movimento reciproco di braccia risulta pressoché assente e l'anca subisce una rotazione verso l'esterno rispetto al gran trocantere, mentre le ginocchia appaiono in mutua estensione. Con la crescita i parametri vanno via via ad assomigliare a quelli di un adulto: a 2 anni compare lo swing reciproco delle braccia ed aumenta la stabilità posizionale, a 3 anni i pattern cinematici degli adulti sono quasi tutti presenti (fig. 3), ma solo intorno ai 7 anni viene raggiunta la maturità motoria (fig. 4). La variabilità cinematica è risultata essere molto maggiore nei bambini rispetto agli adulti. Le principali differenze sono state riscontrate in relazione ai muscoli utilizzati per avere potenza nella fase di cammino: i bambini usano maggiormente i muscoli flessori ed estensori dell'anca, a discapito dei flessori plantari delle caviglie (Sutherland, 1988). Sono stati individuati 5 parametri che sembrano variare in maniera significativa nel periodo di sviluppo:

- Il posizionamento reciproco dei singoli arti al crescere dell'età;
- L'aumento della velocità del passo al crescere dell'età e della lunghezza degli arti;
- La diminuzione della cadenza del passo al crescere dell'età e della lunghezza degli arti;
- L'aumento della lunghezza del passo al crescere dell'età e della lunghezza degli arti;
- La diminuzione del rapporto della distanza tra le caviglie in relazione alla posizione dell'anca.

Alcuni di questi parametri (velocità, cadenza, lunghezza del passo) più il peso corporeo sono stati normalizzati ed adoperati in uno studio su 324 bambini sani allo scopo di creare dei grafici utilizzati in ambito clinico per capire se i cambiamenti nel cammino siano dovuti solo e genericamente alla crescita o a specifici fattori (Todd et al., 1989).

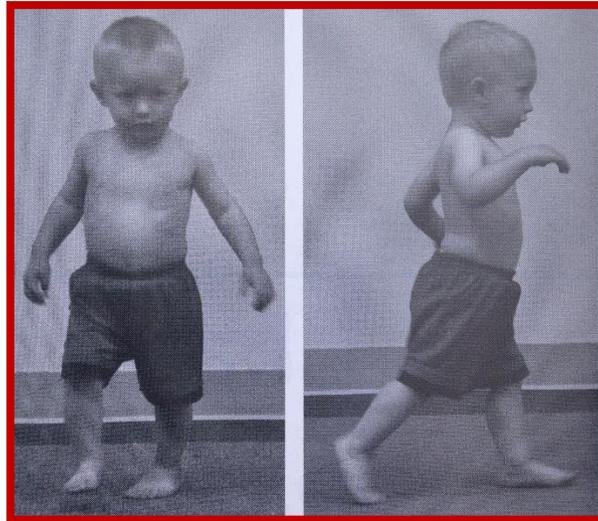


Figura 2 - La "posizione di guardia" in un bambino di 14 mesi

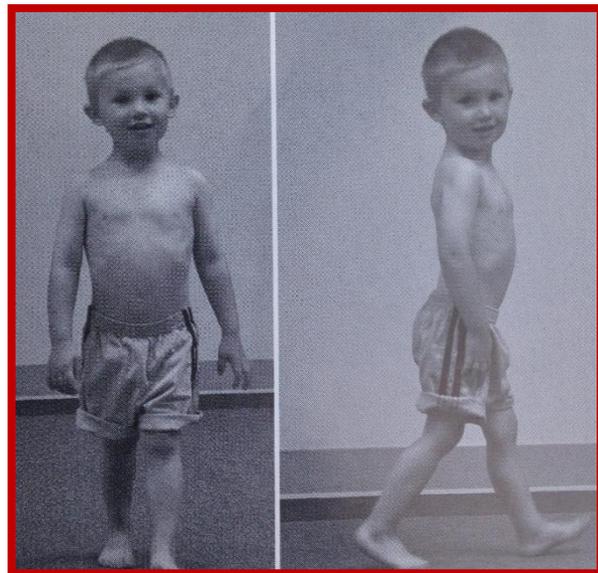


Figura 3 - La camminata di un bambino di 3 anni

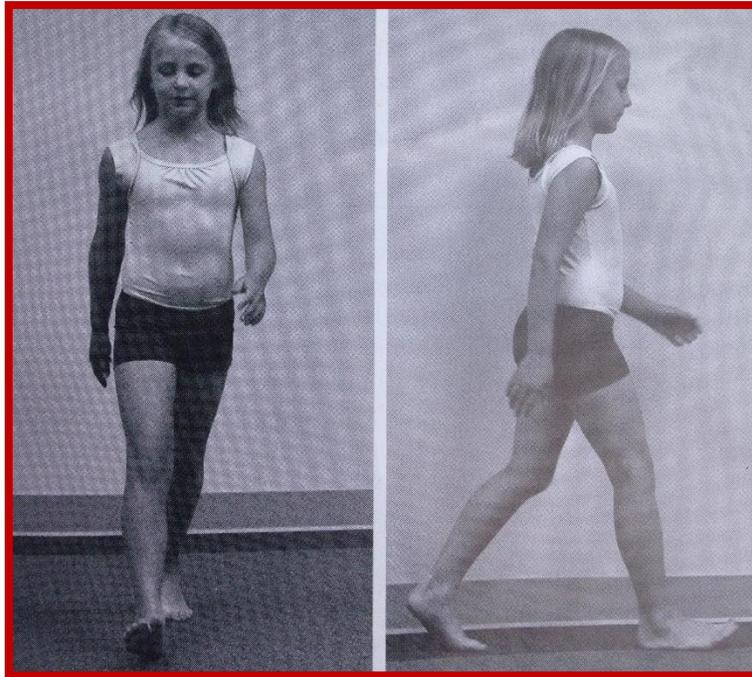


Figura 4 - La camminata di una bambina di 7

Un' altro esperimento cardine tra gli studi sullo sviluppo motorio è stato condotto sui pattern del cammino in bambini di età differenti per periodi variabili tra un mese e oltre due anni di osservazioni, nel quale è stato riscontrato che la cadenza e la lunghezza del passo sono indipendenti da età e velocità di andatura, ed il fattore determinante è stato individuato nella crescita del peso dei segmenti corporei (Beck et al., 1981). L'età di stabilizzazione dei pattern adulti è stata trovata essere intorno al 5° anno, mentre è risultata esserci ancora molta variabilità a 4 anni.

A seguito di queste considerazioni sono stati portati avanti esperimenti per valutare la correlazione tra sviluppo del cammino e fattori specifici, e risultati importanti sono stati riscontrati in uno studio del 2001 su bambini di età compresa tra i 5 ed i 12 anni (Stansfield et al., 2001). Considerando questa come età in cui avvengono i cambiamenti cinetici e cinematici fondamentali (Grieve & Gear, 1966) (Menkveld, 1998), è stato dimostrato che la velocità, non l'età, porta delle evidenti modificazioni nei pattern del cammino. Sulla falsariga di queste considerazioni è stato condotto uno studio sulle diverse velocità di andatura (van der Linden et al., 2002). Ai bambini è stato richiesto di effettuare camminate a 5 differenti velocità prefissate, tutte più lente di una normale andatura scelta spontaneamente, normalizzando i risultati ottenuti in base al peso dei soggetti. Come risultato si è visto che la velocità è risultata molto

influyente in termini di angoli articolari, momenti e forze di reazione al suolo, e che gli effetti variavano anche in relazione ai differenti range di andatura. Si è giunti alla conclusione che l'uniformità tra velocità, più che tra età o peso, è determinante per comparare le caratteristiche del cammino tra soggetti sani e patologici (ad esempio affetti da displasia cerebrale) ed per evidenziare gli effetti della malattia in questo ambito.

1.2.4 Ridondanza e ripetibilità

La molteplicità di teorie sull'aggiustamento dei parametri ottimali per un cammino simile agli adulti e sul raggiungimento di un pattern cinematico maturo lascia ancora molti dubbi, e quindi spazio a ricerche e dibattiti su quale possa essere il "fattore guida" in questo ambito, oltre che sull'età effettiva della stabilizzazione. I concetti di "ridondanza" e "ripetibilità" giocano un ruolo fondamentale in questa disamina. Per ridondanza si intende la vasta scelta di elementi motori per completare un task assegnato, che può essere un esercizio di coordinazione o una semplice camminata. Essa è alla base della variabilità cinematica poiché, pur creando una flessibilità di adattamento a contesti diversi, fa sì che si generino traiettorie sempre differenti anche in esercizi identici (Scholz, e Schöner, 1999). Allo scopo di limitare la ridondanza dei possibili gradi di libertà, il Sistema Nervoso Centrale sceglie un determinato set di soluzioni di movimento e lo segue ed aggiusta in caso di riuscita ottimale di un compito (Bernstein, 1967). Si parla di "ripetibilità" di un individuo rispetto ad un determinato parametro quando, per il raggiungimento di un dato task in più occorrenze, si nota l'utilizzo del medesimo set di soluzioni.

1.2.5 Gli studi più recenti

Valutazioni più recenti si sono basate sul concetto di velocità come parametro cardine di sviluppo motorio ed hanno cercato l'influenza di tale parametro su un ampio raggio di soggetti, di età molto diverse, per determinarne la variabilità intra-individuale (Müller et al., 2013). Più di 800 bambini, di età compresa tra 1 e 15 anni, sono stati analizzati nell'ambito di camminate a corto raggio e medie ripetizioni (3 metri, 10 camminate). È stata osservata una importante riduzione nella variabilità della velocità in soggetti suddivisi per età e per peso corporeo crescente, dove addirittura il gruppo dei più grandi presentava un coefficiente di variabilità pari ad un terzo di quello dei più piccoli. L'età di separazione più significativa di questi due gruppi è stata valutata negli 8 anni.

Le considerazioni sull'interazione tra velocità ed età sono state riprese in uno studio (Van Hamme et al., 2015) su bambini di età compresa tra 1 e 7 anni, periodo di vita dove la letteratura appariva alquanto carente. Sono stati analizzati i due fattori sopracitati sia in maniera assoluta che in interazione reciproca e ne è stata valutata l'influenza sui parametri biomeccanici principali. Il risultato di questo studio è stato quello di definire dei target di normalità basati su regressioni lineari a cui riferirsi in caso di confronto con valori di soggetti patologici, allo scopo di evidenziarne le effettive anomalie nella crescita con valida accuratezza.

Dalla letteratura (Breniere e Bril, 1988, 1998) si apprende come l'accelerazione verticale del centro di massa dei bambini risulti negativa rispetto al contatto del piede al suolo, ovvero come i bambini letteralmente "cadano" ad ogni passo. Superati i 4 anni si vede un progressivo miglioramento di questo parametro, che poi, ad un'età compresa tra i 5 ed i 6 anni, porta ad avere valori positivi, in conformità con gli adulti. Questa fascia di età (4-6 anni) diviene quindi la più indicata per capire quale sia il fattore determinante nello sviluppo del cammino infantile.

In uno studio su adulti sia sani che affetti da patologie neuromuscolari (Papi et al., 2015) è stato ipotizzato che per il controllo del centro di massa possano essere utilizzate diverse combinazioni di angoli articolari degli arti inferiori. Come risultato è stata notata una correlazione tra la variabilità degli angoli cinematici e quella della posizione del CoM, che ci porta ad ipotizzare un suo utilizzo anche in pazienti sani.

Stern (Stern, 2012) ha condotto delle analisi sulla variabilità della cinematica segmentale nei bambini, ed è giunto alla conclusione che almeno fino ai 5 anni questa risulta troppo differente da quella degli adulti, il che porterebbe a dire che la maturità del cammino, a quell'età, sia ancora molto lontana. Poiché a 6 anni il pattern cinematico è stato visto essere quasi identico a quello degli adulti (Perry, 1992), sembra esserci una incongruenza.

1.3 Scopo dell'elaborato

La letteratura ha dimostrato che guardando ai diversi pattern degli angoli articolari è difficile quantificare e caratterizzare lo sviluppo del cammino perché la variabilità inter e intra-subject nei bambini è ancora molto alta. L'ipotesi di questo lavoro è che la traiettoria del centro di massa del corpo (CoM) sia un fattore caratterizzante la maturazione del cammino nei bambini. È stato analizzato il cammino a velocità spontanea di soggetti appartenenti a diverse fasce di età, allo scopo di valutare e verificare questa ipotesi. Sono stati presi in considerazione dei bambini in età prescolare (circa 4 anni) e scolare (circa 6 anni), e dei soggetti di età compresa tra i 20 ed i 30 anni, come riferimento significativo di pattern cinematico

maturato. Dato che i bambini di 4-6 anni mostrano ancora una alta variabilità segmentale ma al tempo stesso dalla letteratura emerge che hanno raggiunto una relativa maturazione del cammino, se l'ipotesi del lavoro risulta valida, ci si aspetta che la ripetibilità della traiettoria del centro di massa nei bambini sia ormai simile a quella degli adulti mentre la variabilità segmentale sia maggiore.

1.3.1 Modalità di valutazione

Per verificare questa ipotesi, la variabilità degli angoli articolari e della traiettoria del centro di massa durante il cammino è stata analizzata nelle seguenti condizioni:

- Inter-subject intra test (cioè analizzando la variabilità tra soggetti dello stesso gruppo);
- Intra-subject, intra test (cioè durante camminate consecutive);
- Intra-subject inter test (cioè durante camminate intervallate da pause).

Capitolo 2: Materiali e metodi

2.1 Soggetti

Allo studio hanno preso parte 21 soggetti, non affetti da patologie neurologiche e/o muscolo-scheletriche, divisi per fasce di età: sette bambini di 4 anni, sette bambini di 6 anni e sette giovani adulti.

I partecipanti hanno indossato costume da nuoto o pantaloncini aderenti, allo scopo di limitare l'interferenza degli indumenti sulla rilevazione tramite marker (Hazlewood et al., 1997).

Per l'adesione al progetto gli adulti ed i genitori dei bambini coinvolti hanno firmato dei moduli di consenso informato regolarmente approvati dall'Alma Mater Studiorum di Bologna.

| Età (anni) | Numero | Maschi / Femmine | Altezza (cm) | Peso (Kg) |
|---------------|--------|------------------|-----------------|--------------|
| 4±0 | 7 | 3 / 4 | 101±3 | 17±2 |
| 6±0 | 7 | 4 / 3 | 121±2 | 22±1 |
| 23±1 | 7 | 3 / 4 | 157±8 | 61±7 |

2.2 Test

A ciascun partecipante è stato richiesto di camminare a piedi nudi in laboratorio a velocità spontanea per un numero di acquisizioni ritenuto sufficiente dal punto di vista della ripetibilità. È stata presa in considerazione l'esecuzione di un numero totale di 15 camminate (andata e ritorno tra punti estremi delimitati dalla geometria della struttura), ripartite in tre gruppi da 5 ed intervallate da una pausa di circa 7 minuti. Durante tali pause ai soggetti è stato richiesto di svolgere alcuni esercizi di coordinazione motoria, quali: rimanere in equilibrio su un solo piede (prima l'uno poi l'altro) per più di 8 secondi; effettuare una camminata completa in punta di piedi; effettuare una camminata completa a "passo di formica" (ovvero con un piede davanti l'altro in linea retta, con il minimo spazio tra tallone e punta). Tali esercizi sono stati sfruttati sia allo scopo di distrarre i soggetti dal test di cammino a cui si stavano sottoponendo e sia per valutare qualitativamente, nei bambini, il livello di sviluppo della coordinazione.

2.3 Equipaggiamento e procedura sperimentale

Per il presente lavoro di tesi è stata utilizzata la strumentazione presente all'interno del Laboratorio di Ingegneria Biomedica "LIB" del Polo scientifico-didattico di Cesena dell'Università Alma Mater Studiorum di Bologna. In particolare è stato adoperato il materiale fornito dal pacchetto BTS Smart-DX, comprensivo di workstation, telecamere, marker e set per la calibrazione.

2.3.1 BTS Smart-DX Italia

Per acquisire i dati di cinematica in 3D è stato adoperato un sistema stereofotogrammetrico progettato dalla BTS Bioengineering per uso in ambito clinico e sportivo siglato BTS Smart-DX. Tale sistema ricostruisce le coordinate tridimensionali dei marker posti sul soggetto attraverso un software chiamato Smart Capture, che consente la gestione real time dell'intero processo di calibrazione ed acquisizione dati. La traiettoria è stata rilevata tramite un set di 6 telecamere con sensori ad elevata sensibilità (fig. 5), collegate ad una workstation.

Queste sono dotate di illuminatori esterni posti attorno all'obiettivo, che acquisiscono le immagini con una risoluzione di 1,4 MegaPixel, ad una frequenza di circa 200 Hz.

| Caratteristica | Descrizione |
|--|----------------------------|
| Numero di telecamere | 6 |
| Tipo sensori | Charged Coupled Device |
| Risoluzione massima | 1,4 Mpixel (fino a 200 Hz) |
| Frequenza massima | 500 Hz |
| Frequenze ammesse | 200,250,500 Hz |
| Algoritmo di ricostruzione marker | Enhanced blob analysis |
| Acquisizione con luce solare | Sì |
| Livelli di grigio (profondità di colore) | 256 tonalità (8 bit) |
| Possibilità di acquisire segnale VGA | Sì |

| | |
|---|------------------|
| Scala grigi (simi) | |
| Possibilità di vedere l'immagine dalla telecamera | Sì |
| Trasmissione dati | Gigabit Ethernet |
| Numero di cavi per telecamera | 1 |
| Acquisizione segnali analogici esterni | Sì |
| Numero canali A/D converter | 32 |
| Frequenza per canale | 1 KHz |
| Risoluzione per canale | 16 bit |



Figura 5 - Fotocamera del sistema SMART-DX

La workstation è costituita da un elaboratore ad elevate prestazioni sul cui pannello posteriore sono presenti gli ingressi per l'alimentazione e l'acquisizione dati di ogni camera e per la connessione delle pedane dinamometriche.

I marker passivi, rivestiti di materiale catarifrangente, quando posizionati sul soggetto in esame riflettono la luce infrarossa irradiata dagli illuminatori delle telecamere: durante l'acquisizione del movimento le telecamere illuminano, di tale luce, il volume di registrazione e i marker la riflettono. Le telecamere registrano i segnali infrarossi superiori ad una certa intensità ed è sufficiente che almeno due di esse abbiano nel loro campo visivo il marker perché ne sia determinata la posizione con precisione. Con il presente sistema di acquisizione l'errore nella determinazione della posizione del marker in genere è inferiore ad 1 mm.

La calibrazione è stata effettuata sia in modalità statica che dinamica, tramite un set composto da: una bacchetta in fibra di carbonio, detta "wand", con tre marker a distanze note, due assi con quattro o due marker bloccati da una cerniera, anch'essi in fibra di carbonio, ai quali è possibile fissare la wand. Con quest'ultima modalità è stata eseguita la calibrazione statica (fig. 6), con assi x e y sui lati della pedana, allo scopo di fissare il sistema di riferimento di laboratorio nel quale calcolare le posizioni dei marcatori. La prova di calibrazione dinamica è stata realizzata muovendo la wand per circa 90 secondi all'interno del volume di acquisizione, allo scopo di avere un report sugli errori di ricostruzione dell'immagine da parte di ciascuna telecamera e sfruttarlo per minimizzare gli artefatti da distorsione ottica delle lenti.



Figura 6 - Set di assi per calibrazione statica

Sono inoltre stati utilizzati due software adibiti all'analisi dei dati, BTS Smart-Tracker e BTS Smart-Analyzer. Il primo è stato sfruttato per la visualizzazione delle posizioni dei marcatori acquisite durante la prova, ricostruite in un ambiente virtuale 3D, allo scopo di avere una prima stima qualitativa sull'esito dell'acquisizione, e successivamente per il tracking dei dati. Tramite il secondo, invece, ci si è avvalsi di un protocollo di calcolo per l'analisi del gesto motorio e l'individuazione degli angoli articolari.

2.3.2 Protocollo Davis

Il Plug-in Gait, meglio noto come “protocollo Davis”, è un protocollo sperimentale per sistemi stereofotogrammetrici che definisce il posizionamento dei marcatori direttamente sui repere anatomici. La prima fase del protocollo prevede la rilevazione dei parametri antropometrici del soggetto, quali il peso corporeo, espresso in kilogrammi, l'altezza, la lunghezza della gamba e della tibia, la distanza tra i condili femorali o diametro del ginocchio, la larghezza della caviglia (misurata come la distanza tra i malleoli) ed altri parametri relativi ai segmenti corporei, tutti espressi in centimetri. Alcuni di questi parametri possono non essere calcolati esplicitamente, come ad esempio la distanza tra le spine iliache anteriori superiori destra e sinistra o tra le stesse ed il trocantere, poiché tale processo verrà compiuto in automatico dall'elaboratore.

Successivamente sono stati posizionati i marker (18 in totale) (fig. 7) direttamente sulla cute o sul costume e in particolare:

- tronco: due marker posizionati sulle giunzioni sterno – clavicolari destra e sinistra ed uno alla stessa altezza a livello dell'apofisi spinosa di C7;
- bacino: a livello delle due spine iliache anteriori superiori (ASIS) e a livello del sacro in modo che i tre punti siano nello stesso piano contenente le spine iliache anteriori superiori e le spine iliache posteriori superiori (PSIS);
- coscia: gran trocantere, epicondilo del femore più uno su una bacchetta (wand) posta a 1/3 della lunghezza della coscia in modo che il piano contenente i tre punti sia parallelo al piano frontale;
- gamba: malleolo laterale, testa della fibula e un altro su una wand similmente alla coscia;
- piede: calcagno e testa del secondo metatarso, tallone solo nelle prove statiche.

La disposizione del marker set appena descritto risulta ottimale dal punto di vista della visibilità, infatti tutti i marker sono posti sui lati esterni dei segmenti corporei; tuttavia nel caso di acquisizioni di movimenti rapidi ed intensi le bacchette possono essere soggette a vibrazioni.

Il protocollo prevede poi un'acquisizione statica (posizione di riferimento degli angoli relativi a due segmenti contigui) o calibrazione del soggetto. Quest'ultima è un'operazione effettuata durante la fase di standing e consiste nell'acquisizione per qualche secondo del soggetto in posizione eretta. In questo modo viene acquisita la posizione iniziale dei marker rispetto al corpo che, integrata con calcoli eseguiti a partire dalle misure antropometriche, consente la stima dei centri di rotazione articolari. In questa fase di acquisizione deve necessariamente essere presente un marker sul tallone destro e sinistro, anche se questi verranno poi tolti nella fase di acquisizione dinamica. Questo passaggio serve a identificare la posizione del piede e quindi valutare l'occorrenza di piede "piatto" o "equino". Tale fase risulta critica, in quanto una erronea valutazione dei dati porterà ad elaborare dei risultati inconsistenti.

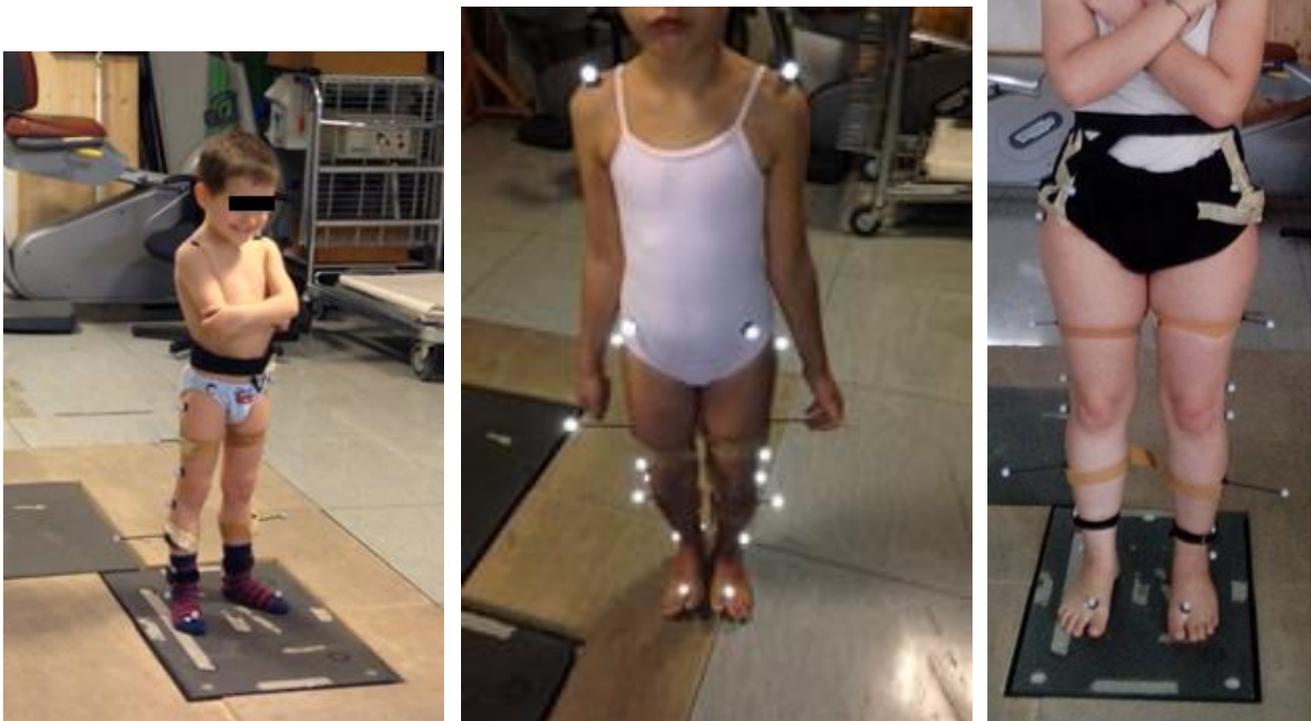


Figura 7 - Disposizione del marker set in soggetti di età differente

Dalle traiettorie dei marker, ricostruite con il sistema di motion capture, e dalle misure antropometriche, si ottengono le coordinate nel tempo dei repere anatomici e dei centri articolari, da cui il software calcola gli angoli articolari, lo spostamento relativo, la velocità e le accelerazioni dei segmenti corporei.

2.3.3 Riprese a video

Tutte le fasi delle camminate e degli esercizi di coordinazione motoria durante le pause sono state filmate con videocamera.

2.4 Analisi dei dati

2.4.1 Tracking

Si è sfruttato il software BTS Smart-Tracker per effettuare il tracking. Si tratta di un ambiente grafico (fig. 8) che permette la ricostruzione tridimensionale dei dati utilizzando i dati bidimensionali acquisiti dalle videocamere e quelli provenienti dalla calibrazione. Ad ogni marker viene assegnata una traiettoria, ricostruita collegando la posizione del marker in due frame successivi. Tale processo si basa su algoritmi che usano stimatori ricorsivi dello stato dei sistemi dinamici (come il filtro di Kalman). I file in uscita sono in formato TDF.

In questa fase sono state corrette le tracce laddove le posizioni di due marcatori distinti si fossero sovrapposte durante l'acquisizione, e sono state eliminate le tracce di marker phantom, costruendo un modello tridimensionale del soggetto ripreso.

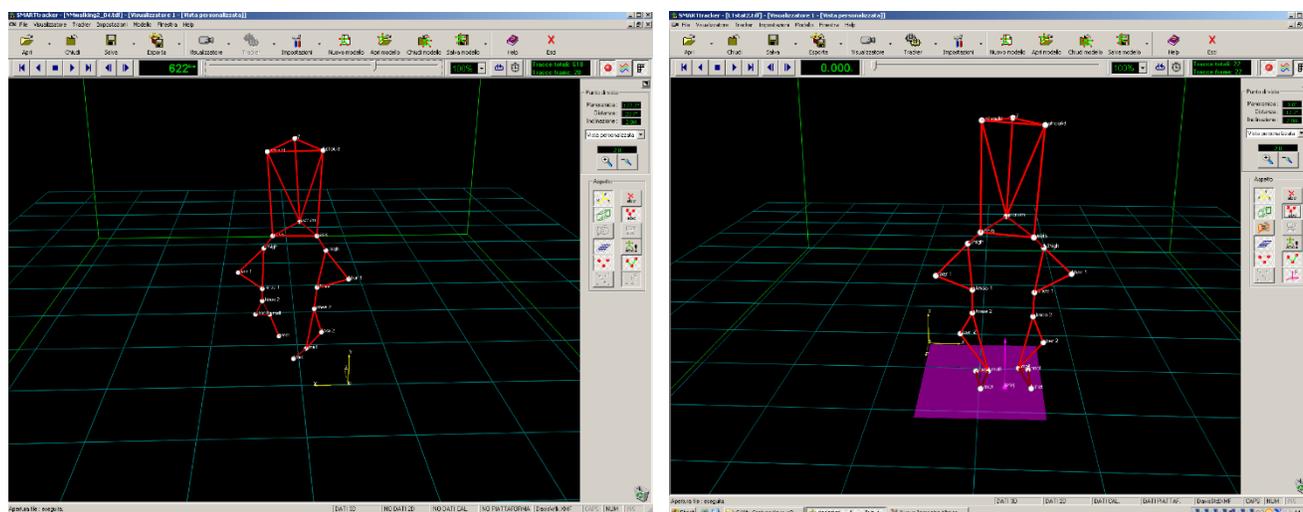


Figura 8 - Ambiente lavoro BTS Smart-Tracker

2.4.2 Elaborazione angoli articolari

Per l'elaborazione degli angoli articolari è stato utilizzato il software BTS Smart Analyzer.

Questo software consente di eseguire un'analisi biomeccanica e di elaborare i dati cinematici e dinamici attraverso la creazione di nuovi protocolli di analisi o lo sfruttamento di quelli maggiormente noti, archiviati nel software stesso. Nell'elaborato in questione è stato utilizzato il protocollo Davis. I file in uscita sono in formato EMT, successivamente trasformabili in formato TXT per la lettura.

Tramite la visualizzazione 3D delle acquisizioni, nella fase successiva al tracking, è stato possibile calcolare gli angoli avvalendosi del sistema di riferimento impostato durante la fase di calibrazione e dei dati antropometrici dei soggetti, raccolti prima dell'inizio del test.

Sono stati consegnati all'elaboratore i frame dell'esecuzione di Heel Strike e Toe-Off (fig. 9) delle singole camminate in un unico verso di percorrenza alternativo, ripetendo l'operazione per lo step destro e sinistro. Il software ha quindi autonomamente calcolato e graficato (fig. 10) i cicli e le sequenze di cicli di angoli articolari, oltre ad aver operato una tracciatura dei punti dalla quale valutare l'eventuale incongruenza di marcatori, sfuggita nella fase di tracking.

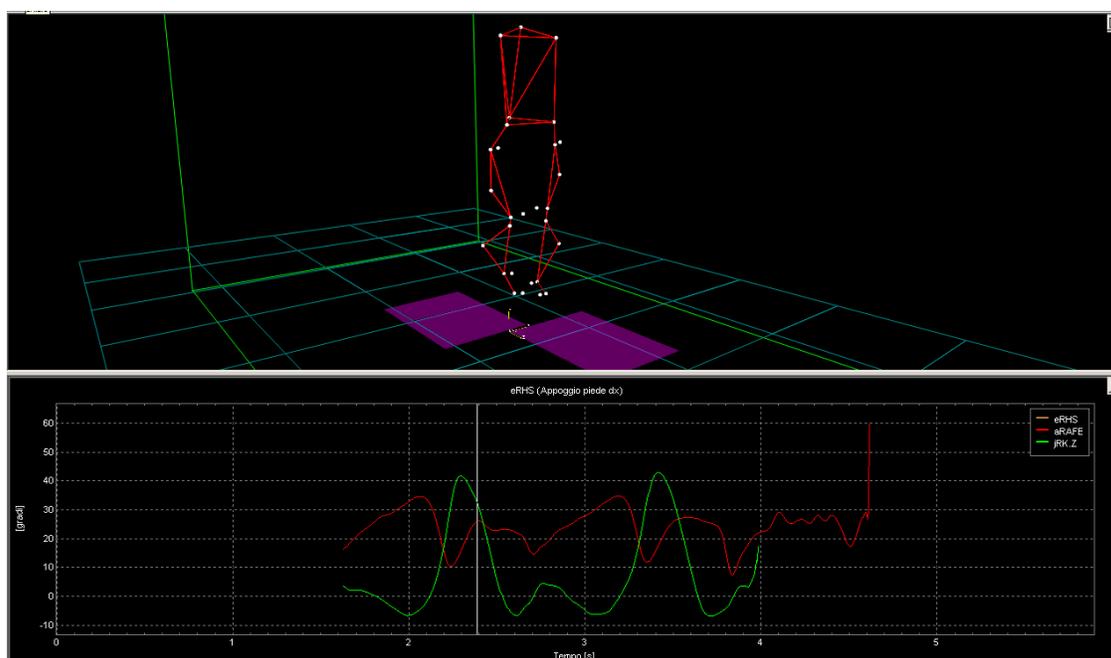


Figura 9 - Individuazione fasi del passo in BTS Smart-Analyzer

2.4.4 Stima centro di massa

La stima del centro di massa dei soggetti è stata operata attraverso una funzione in codice Matlab (definita appunto StimaCoM) creata sulla base dei comuni metodi di calcolo del centro di massa (CoM) (Winter, 2009). Il suddetto codice, per fornire risultati, riceve come dati in ingresso le tracce in formato TXT elaborate da Smart Analyzer nell'istante successivo all'inserimento del protocollo Davis, dove quindi figuravano i marker veri e quelli ricostruiti dal protocollo.

Tali tracce sono state interpolate avvalendosi delle tabelle antropometriche di Dempster (Dempster, 1967) per gli adulti (fig. 11), e dei valori analizzati tramite regressione lineare nello studio di Jensen (Jensen, 1986), per le proporzioni nei bambini. Sono stati utilizzati riferimenti delle masse di piede, gamba, coscia e tronco, sfruttati per trovare i rispettivi singoli centri di massa e successivamente unirli in un'equazione di sommatoria.

$$\text{Mass of foot} = 0.0145 \times 80 = 1.16 \text{ kg}$$

$$\text{Mass of leg} = 0.0465 \times 80 = 3.72 \text{ kg}$$

$$\text{Mass of thigh} = 0.10 \times 80 = 8.0 \text{ kg}$$

$$\text{Mass of HAT} = 0.678 \times 80 = 54.24 \text{ kg}$$

Figura 11 - Dati di Dempster per un adulto di 80 Kg

2.4.5 Analisi variabilità

Per l'elaborazione ci si è avvalsi di un codice Matlab appositamente creato sia per la variabilità degli angoli articolari che per la variabilità del centro di massa (AngleVariability e ComVariability). Per entrambe le funzioni sono state fornite in ingresso al codice le camminate di un soggetto alla volta in formato MAT, successivo alla lettura finale dei dati provenienti dallo Smart Analyzer.

Per la prima è stato caricato il file "Sequenza Cicli di Angoli", dal quale sono state dedotte la media e la deviazione standard relativa alle prime singole 5 camminate di un test, ripetuto successivamente anche per le altre due.

Per la variabilità del centro di massa sono stati sfruttati come indici i frame degli eventi del passo trovati con Smart Analyzer, con un minimo margine di errore non eliminabile (10 frame), e sono state interpolate le tracce relative ai marcatori utilizzati nella prova avvalendosi delle distanze fornite dalle tabelle

antropometriche. Il centro di massa è stato calcolato a partire dalla funzione StimaCoM, descritta nel punto precedente, dove piccole correzioni sono state apportate in riferimento alla posizione della 5° vertebra lombare, la quale, come in riferimento ai dati di Dempster, è il punto dal quale poter calcolare matematicamente il centro di massa del tronco e dell'intero corpo.

Media e deviazione standard sono state calcolate per gli intra-test e successivamente per gli inter-test, prendendo in considerazione la deviazione standard relativa tra le tre serie di camminate. Per le analisi intra-test si è tenuto conto principalmente del secondo blocco di camminate in quanto questo è risultato essere il più stabile in termini di ripetibilità, specialmente nei 4 e 6 anni, dove le prime camminate erano spesso di “assestamento” e nelle ultime vi erano difficoltà dovute all'attenzione dei soggetti. Per gli adulti è risultato pressoché indifferente il blocco di camminate selezionato.

L'analisi è stata condotta sul centro di massa (lungo i 3 assi di riferimento) (fig. 12) e sui 22 angoli articolari, ed è stata effettuata secondo le seguenti modalità:

- Inter-Subject in condizione di intra-test: si è valutata la variabilità sulle 5 camminate eseguite da un singolo soggetto in relazione all'andamento medio dei coetanei, confrontando la variabilità tra soggetti dello stesso gruppo con quella dei gruppi di età differenti. I grafici sono stati costruiti utilizzando la differenza tra la media dei valori analizzati sulla seconda trince di camminate di un individuo e la media delle medie di tutti i coetanei per la medesima trince, calcolata in valore assoluto;
- Intra-Subject in condizione di intra-test: si è valutata la variabilità sulle 5 camminate eseguite da un singolo soggetto. Si è confrontata la variabilità sulle 5 camminate consecutive nei tre gruppi di età differenti. Per costruire i grafici sono state utilizzate le deviazioni standard relative alla seconda trince di prove;
- Inter-test in condizione di intra-subject: si è valutata la variabilità sui tre blocchi di camminate eseguite da un singolo soggetto. Si è confrontata la variabilità sui tre gruppi di camminate nei tre gruppi di età differenti. Nei grafici sono state riportate le curve delle medie di ogni blocco \pm la corrispettiva deviazione standard per un singolo soggetto, e paragonate a quelle dei coetanei e delle altre fasce di età.

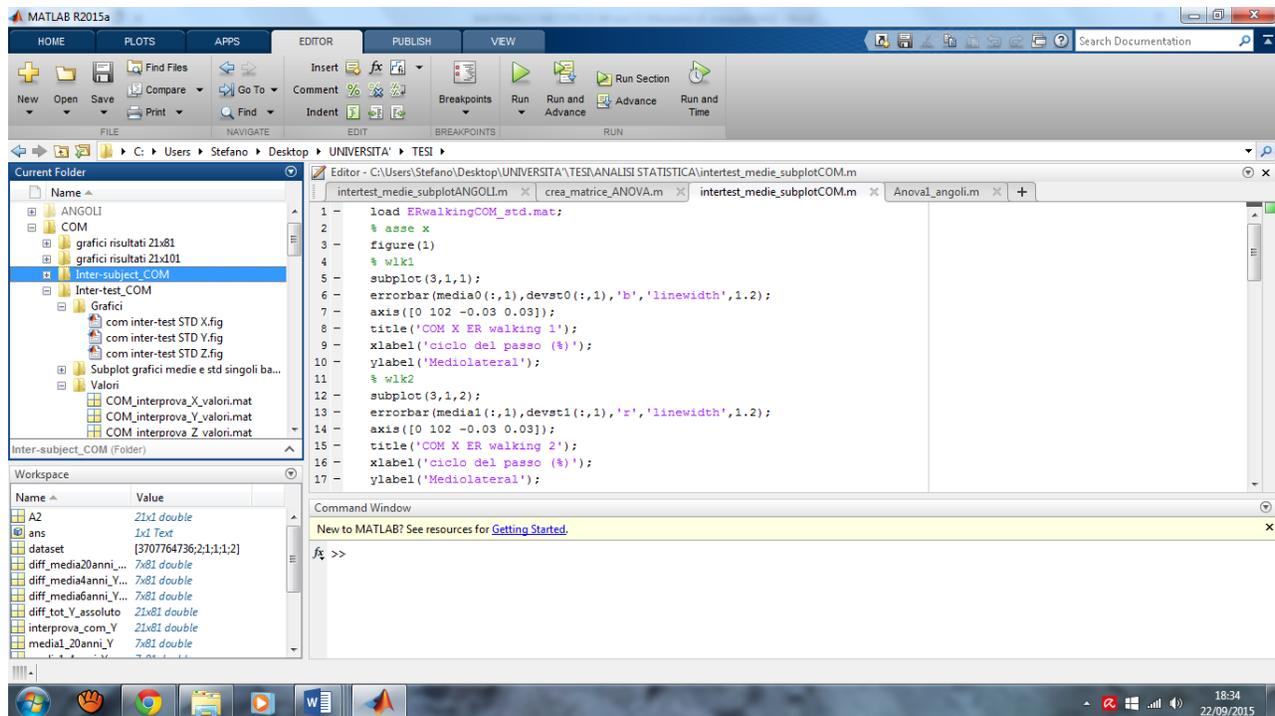


Figura 12 - Codice Matlab per l'analisi della variabilità

2.5 Analisi statistica

L'analisi statistica è stata condotta utilizzando un pacchetto software open source in codice Matlab chiamato SPM1D (vers. 0.3.1, Pataky TC, 2015) (si veda Nota a fine capitolo), ed è stata affiancata da uno studio descrittivo dei parametri di interesse secondo le modalità descritte nel paragrafo precedente. È stato effettuato preventivamente un T-test tra i bambini di 4 e quelli di 6 allo scopo di confermare l'effettiva divergenza di variabilità e di trend dei parametri tra i due gruppi e scartare un eventuale accorpamento delle due fasce di età. Successivamente è stata effettuata un'analisi della varianza (fig. 13) per valutare la variabilità dei parametri cinematici dei tre gruppi di soggetti in relazione al solo fattore età (One-Way ANOVA). Come descritto nel paragrafo precedente, sono stati analizzati il centro di massa lungo i 3 assi di riferimento e i 22 angoli articolari previsti dal protocollo, e vi è stata una suddivisione secondo tre diverse modalità: Inter-Subject (in condizione di intra-test), Intra-Subject (in condizione di intra-test) e Inter-test (in condizione di intra-subject). Nella prima sono state inserite nel codice le medie della seconda trance di camminate di tutti i soggetti a cui è stato precedentemente sottratto il valor medio relativo alla rispettiva fascia di età; nell'Intra-Subject sono state inserite nel codice le deviazioni standard

relative al secondo blocco di camminate per tutti i soggetti presi in considerazione nello studio; nell'Inter-test sono state inserite nel codice le deviazioni standard calcolate su tutte e tre le prove di cammino, per ogni soggetto. È stato applicato per tutte e tre le modalità un livello di significatività α pari a 0.05 (5%), aumentato talvolta a 0.1.

Attraverso le funzioni inserite nel software sono stati creati grafici in cui è ben evidente la variabilità del parametro preso in considerazione: il superamento della soglia α indica una marcata differenza tra i valori inseriti nell'analisi.

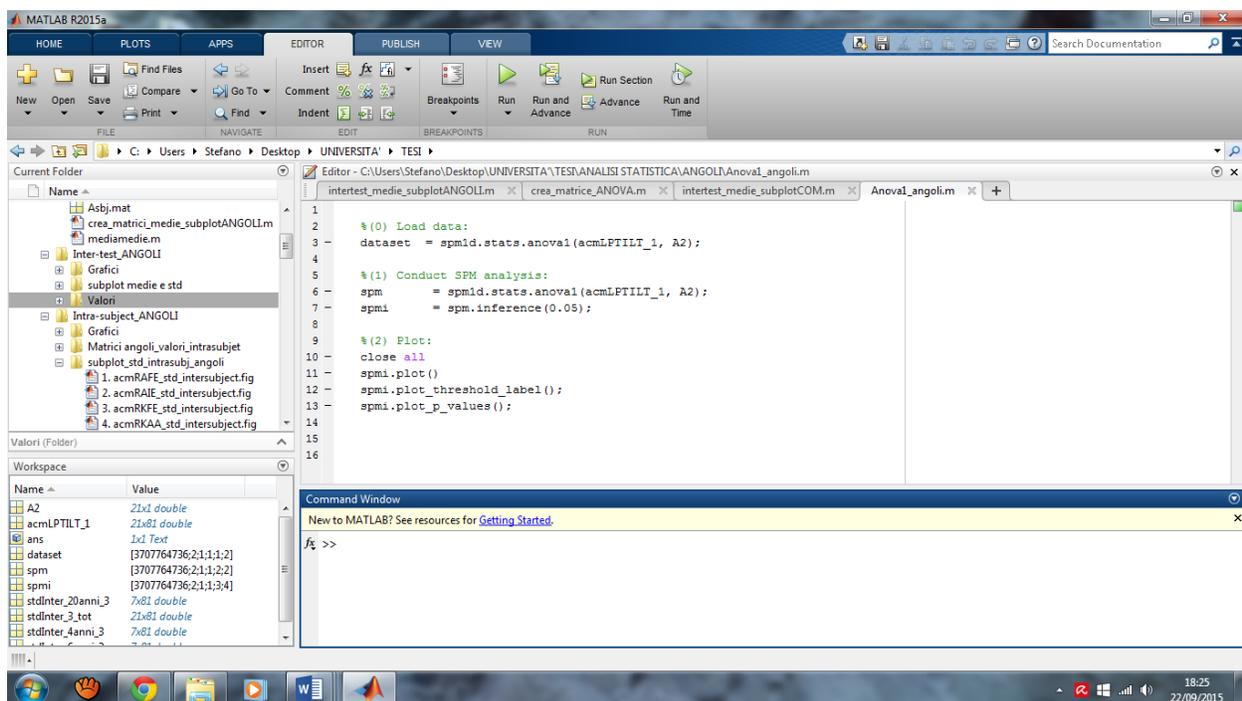


Figura 13 - Codice Matlab per l'ANOVA in SPM1D

NOTA: La Statistical Parametric Mapping è un approccio metodologico che sfrutta la Random Field Theory nell'ambito del confronto di bioimmagini e grafici con valori distribuiti (sotto l'ipotesi nulla) in relazione alle comuni forme di analisi statistica (regressione lineare, T-test, ANOVA). È un metodo che consente analisi confermative o esplorative dei dati nel continuo trattandoli come dati discreti, indipendentemente dalla frequenza di campionamento. In questo modo si superano, ad esempio, le problematiche volume-correlate nell'inferenza statistica su comparazioni multiple. Il confronto tra curve è possibile secondo l'ipotesi della non indipendenza temporale e spaziale dei dati biomeccanici, che risultano invece legati ("bounded") e registrabili tra loro. Il vantaggio innovativo di questa tecnica è quello di visualizzare in dei grafici 1D la significatività del fattore che si vuole analizzare valutando dove questo ha effetto in un arco temporale definito, o dove due trend risultano statisticamente differenti, ma senza fare ipotesi preventive su quali parametri della curva si andranno a trattare. Nei codici vengono fissati dei valori soglia, che rappresentano la percentuale di curve random che supera un valore medio creato in automatico sulla base dei dati inseriti e del tipo di test che si vuole condurre. Questo consente una visualizzazione immediata di eventuali variazioni significative dei parametri studiati.

Capitolo 3: Risultati

In questo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dall'analisi di tutti i 21 soggetti (7 bambini di 4 anni, 7 bambini di 6 anni, 7 adulti) sia per quanto concerne il centro di massa che per gli angoli articolari. I parametri vengono riportati in tre gruppi distinti a seconda del metodo utilizzato per l'elaborazione e la stesura dei grafici:

- Inter-subject (in condizione di intra-test);
- Intra-subject (in condizione di intra-test);
- Inter-test (in condizione di intra-subject).

Tutti i valori, derivati dall'analisi tramite BTS Smart-Analyzer, sono stati elaborati nell'arco di 100 frame, che rappresentano la percentuale di un ciclo del passo completo, dove 0% e 100% indicano i due Heel Strike consecutivi dello stesso piede. Per i grafici derivati dalle ANOVA ad un fattore si è scelto di omettere i 10 frame iniziali e finali, poiché maggiormente affetti da errori manuali durante il taglio dei passi mediante il software BTS, operando quindi un'analisi della varianza su un range di 80 frame con livello di significatività fissato al 5%.

Per la valutazione delle traiettorie del centro di massa è stata fissata la seguente convenzione sugli assi cartesiani:

- L'asse X rappresenta l'asse Medio-laterale;
- L'asse Y rappresenta l'asse Verticale;
- L'asse Z rappresenta l'asse Anteroposteriore.

3.1 Inter-subject

Per l'analisi inter-subject è stata valutata la variabilità tra soggetti dello stesso gruppo sia per la traiettoria del centro di massa che per gli angoli articolari. L'ANOVA non ha mostrato effetto dell'età dei gruppi sull'andamento del centro di massa, mentre si osserva effetto negli angoli articolari della caviglia e della pelvi. Il confronto qualitativo tra le medie dei valori degli angoli articolari ha mostrato un'alta variabilità tra i soggetti di 4 anni con tendenza in diminuzione già nel gruppo dei 6 anni.

COM

La variabilità del centro di massa è risultata essere molto simile tra i 3 gruppi, lungo i diversi assi di riferimento. L'ANOVA applicata mediante SPM1D non ha mostrato effetto significativo. L'asse anteroposteriore, come è visibile dal grafico delle medie, presenta un andamento molto simile in tutti e 3 i sottogruppi.

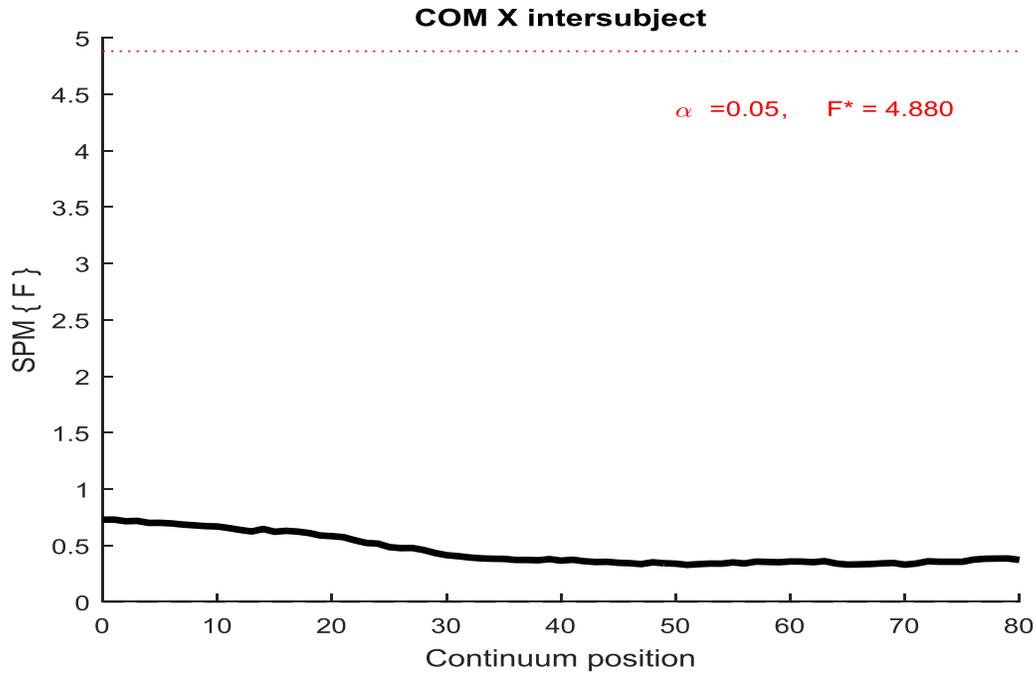


Figura 14 – Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject della traiettoria del centro di massa, asse medio-laterale

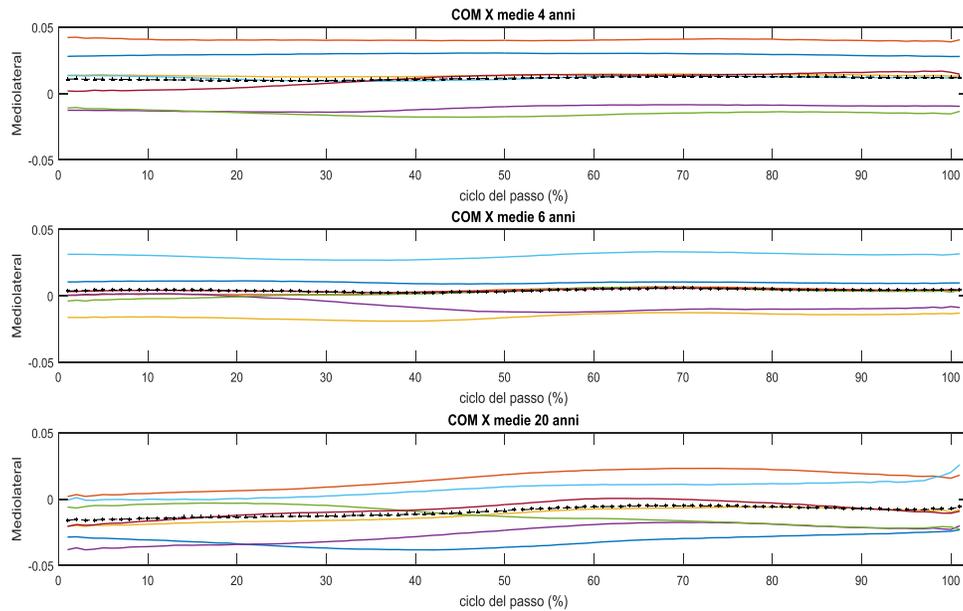


Figura 15 – Traiettoria media del centro di massa lungo l’asse medio-laterale durante un ciclo del passo per ciascun soggetto. La linea nera (asterischi) rappresenta la media dei soggetti del gruppo

Lungo l’asse medio-laterale è presente una discreta variabilità tra i vari soggetti di ciascuno dei 3 sottogruppi, che risultano però essere simili tra di loro sia statisticamente che lungo la media.

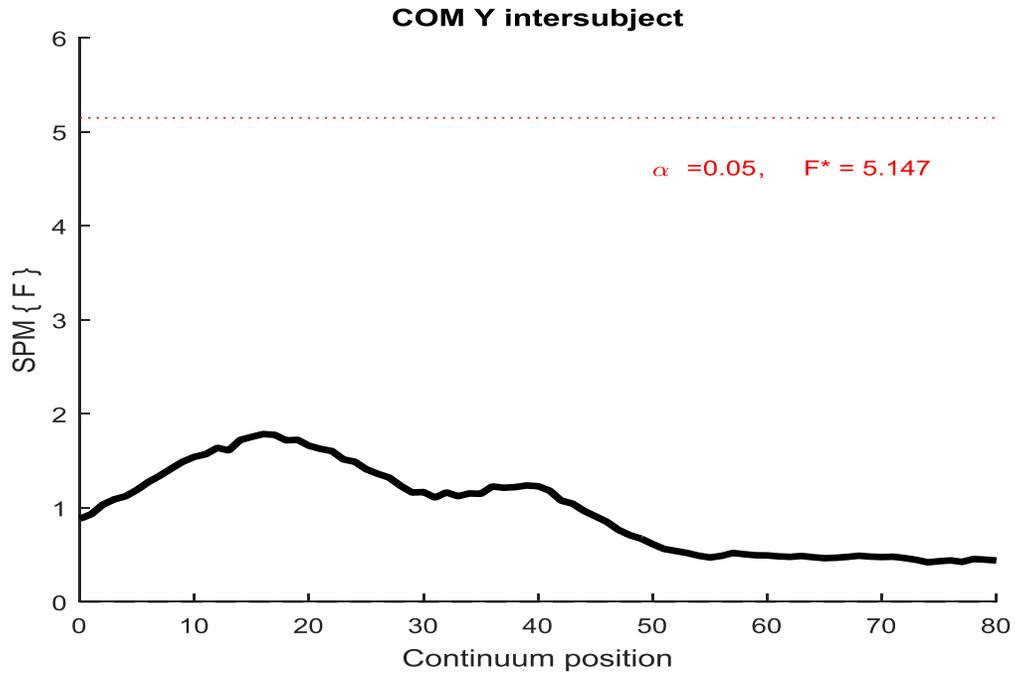


Figura 16 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject della traiettoria del centro di massa, asse verticale

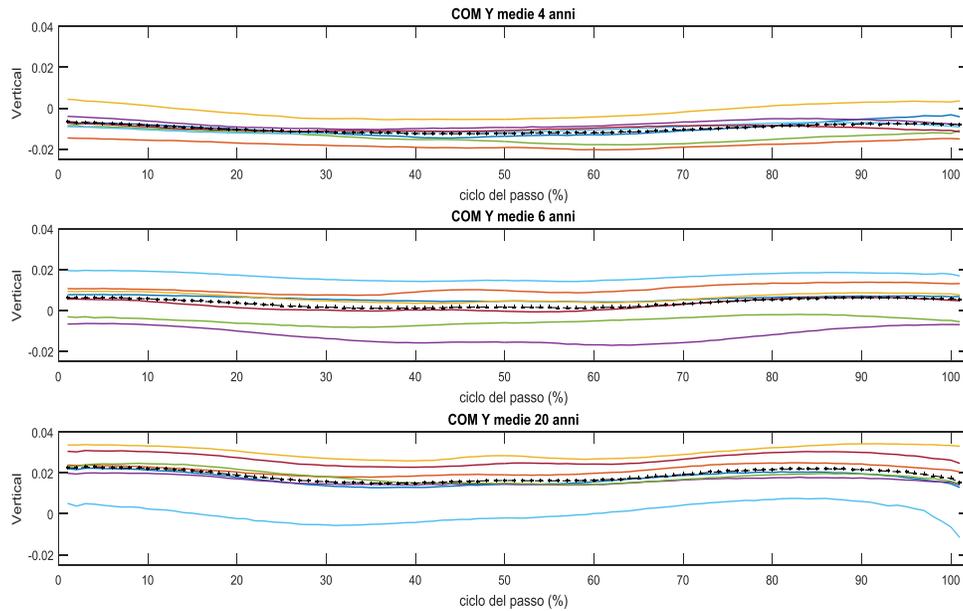


Figura 17 - Traiettoria media del centro di massa lungo l'asse verticale durante un ciclo del passo per ciascun soggetto. La linea nera (asterischi) rappresenta la media dei soggetti del gruppo

L'analisi delle medie non mostra differenze significative fra i tre gruppi.

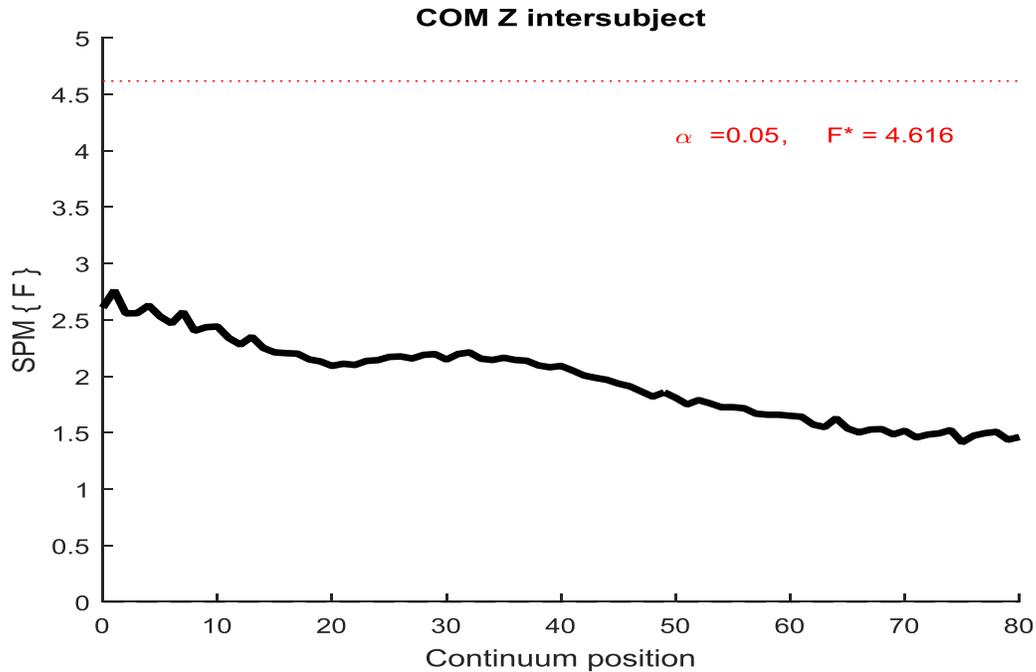


Figura 18 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject della traiettoria del centro di massa, asse anteroposteriore

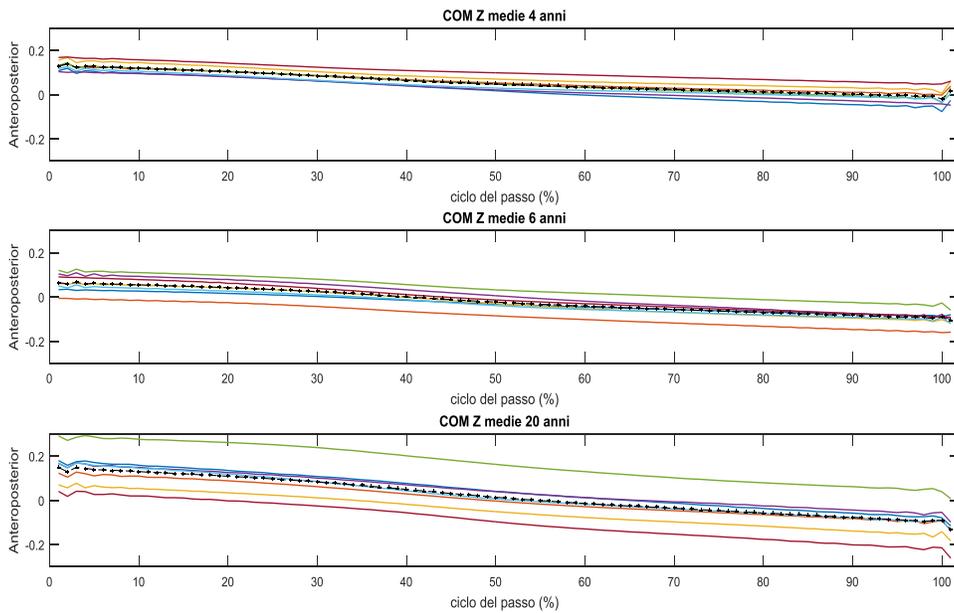


Figura 19 - Traiettoria media del centro di massa lungo l'asse anteroposteriore durante un ciclo del passo per ciascun soggetto. La linea nera (asterischi) rappresenta la media dei soggetti del gruppo

I 4 anni risultano simili tra loro lungo l'asse anteroposteriore, con un andamento pressoché identico sia ai 6 anni che agli adulti. La variabilità del gruppo degli adulti può essere influenzata dalla variabilità in altezza dei soggetti, maggiore nel gruppo degli adulti che nei bambini.

ANGOLI

Gli angoli articolari hanno mostrato una variabilità maggiore nei bambini rispetto agli adulti specialmente nei segmenti distali, come le caviglie. Il movimento di flessione-estensione è risultato essere quello maggiormente interessato da differenze in variabilità, ed è evidente un netto calo nel passaggio dai 4 anni agli adulti. I 6 anni presentano caratteristiche intermedie, diverse a seconda del segmento interessato: risultano maggiormente assimilabili agli adulti nei prossimali ed ai 4 anni nei distali. I movimenti di abduzione-adduzione di anca e ginocchio non sono stati particolarmente interessati da differenze tra i 3 gruppi, a differenza della intra-extra rotazione (per il ginocchio) e della flessione-estensione (per l'anca). La rotazione pelvica si è mostrata statisticamente molto differente nella fase di Terminal-Swing, ma con un assestamento del pattern già a partire dai 6 anni.

CAVIGLIA

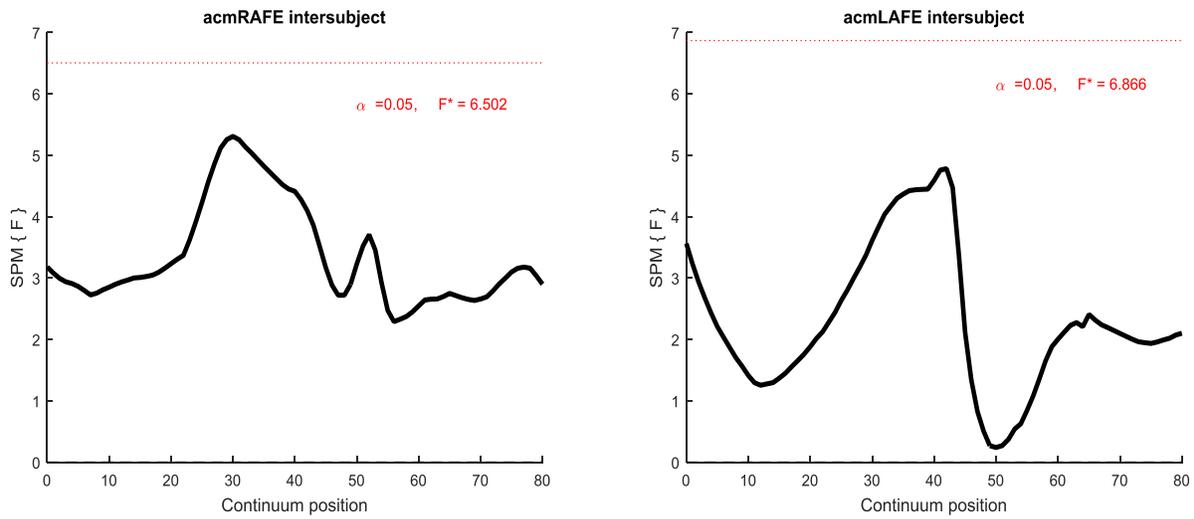


Figura 20 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject dell'angolo di flessione-estensione della caviglia, dx e sx

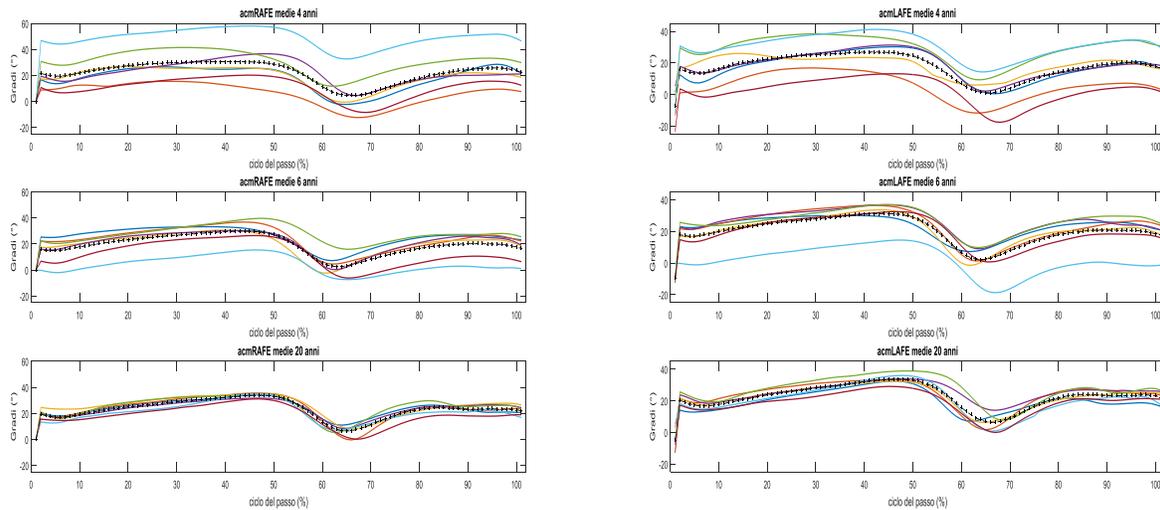


Figura 21 - Valore medio dell'angolo di flessione-estensione della caviglia (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto. La linea nera (asterischi) rappresenta la media dei soggetti del gruppo

Sia per quanto concerne la caviglia destra che la sinistra si può notare l'elevato aumento di conformità nel passaggio dai 4 anni agli adulti. I 6 anni risultano una via di mezzo che presenta ancora variabilità differente dal pattern maturo. Il trend visibile qualitativamente non ha mostrato effetto statistico.

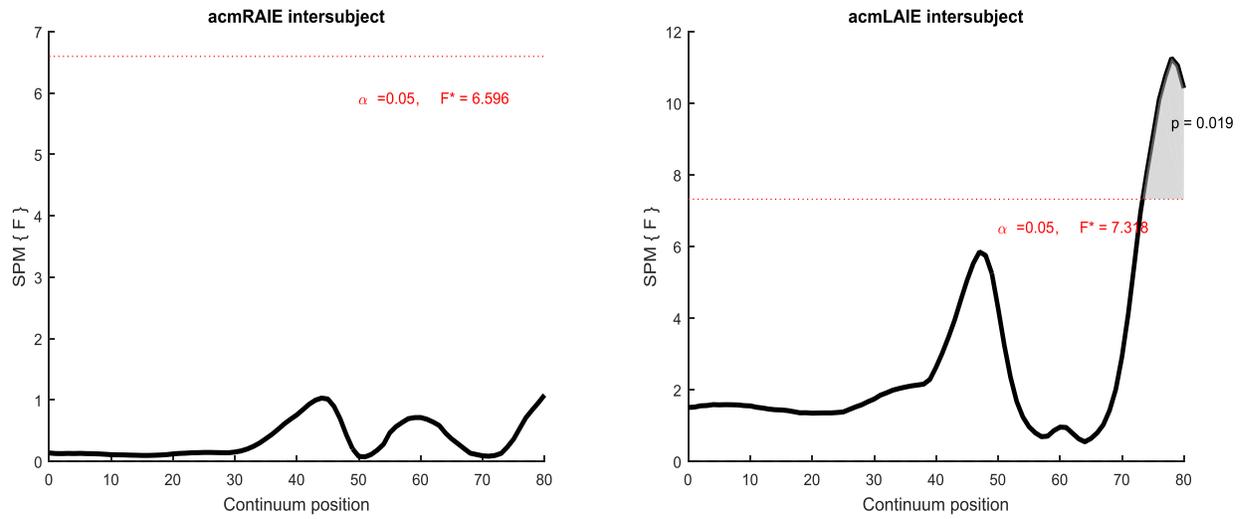


Figura 22 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject dell'angolo di intra-extra rotazione della caviglia, dx e sx

Intra-extra rotazione della caviglia statisticamente molto diversa tra arto destro e sinistro, con variabilità sopra la soglia nella fase di Mid-Swing.

GINOCCHIO

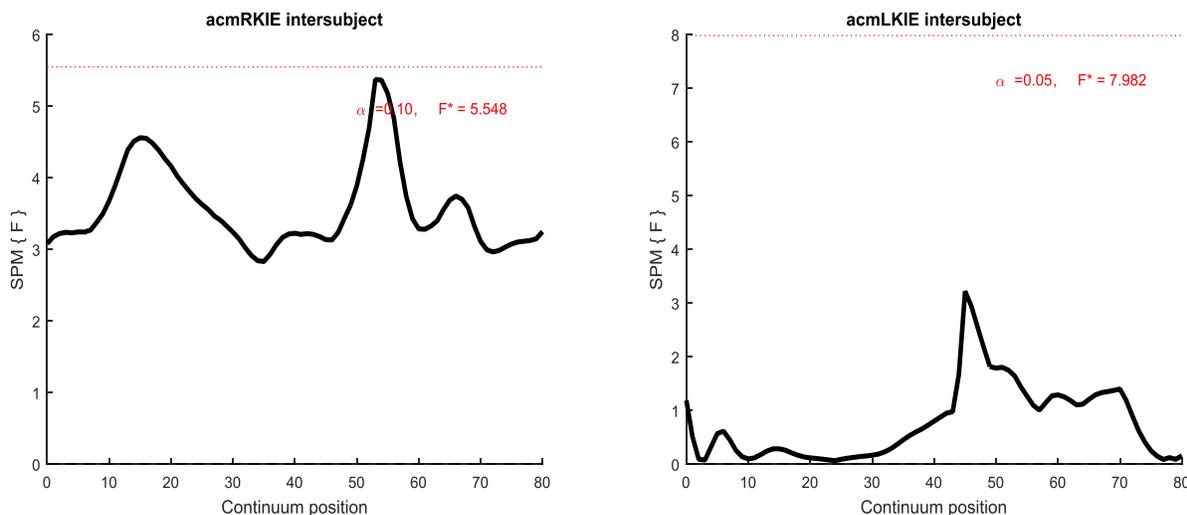


Figura 23 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject dell'angolo di intra-extra rotazione del ginocchio, dx e sx

L'intra-extra rotazione del ginocchio risulta statisticamente simile tra i tre gruppi sia a destra che a sinistra.

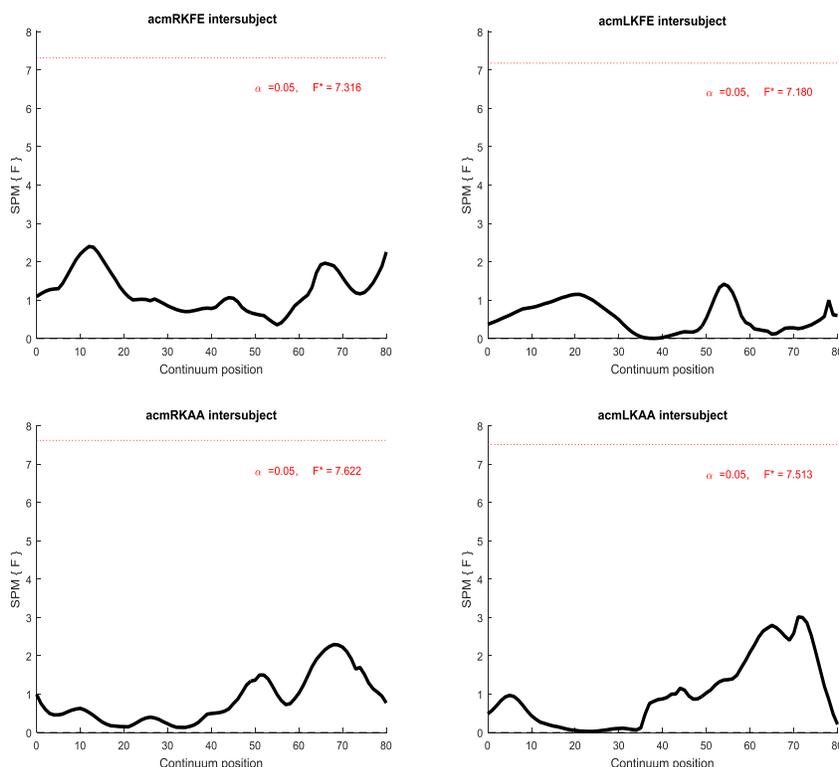


Figura 24 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject degli angoli di flessione-estensione e abd-adduzione del ginocchio, dx e sx

Gli angoli articolari scaturiti dalla flessione-estensione e abd-adduzione non mostrano un effetto dell'età sulla variabilità nei tre gruppi, in maniera simile tra la parte destra e sinistra del corpo.

ANCA

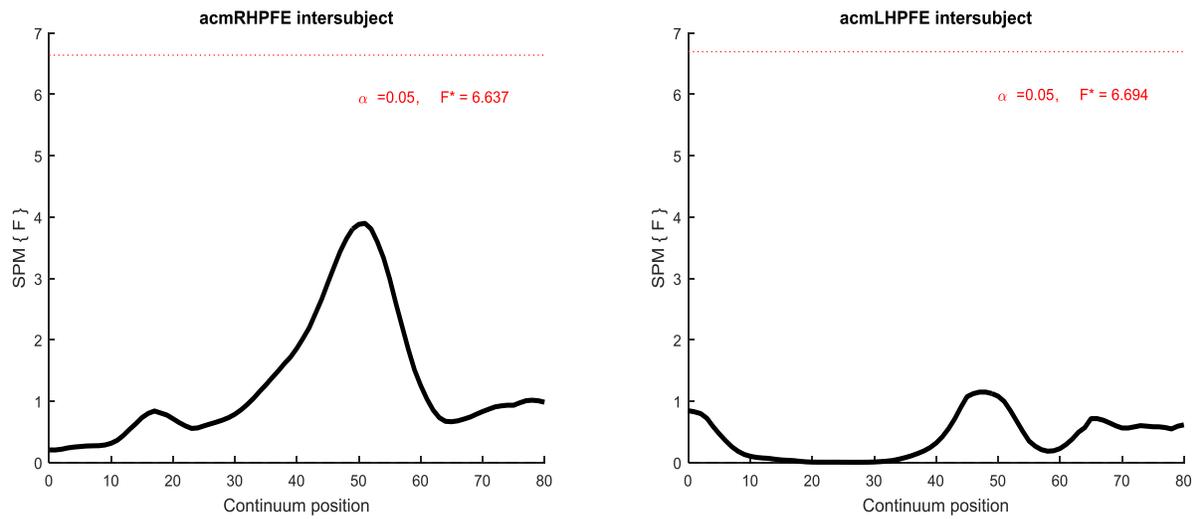


Figura 25 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject dell'angolo di flessione-estensione dell'anca, dx e SX

La variabilità tra i soggetti dello stesso gruppo nel movimento di flessione-estensione dell'anca non presenta differenze significative in funzione dell'età, sia sull'arto destro che sul sinistro.

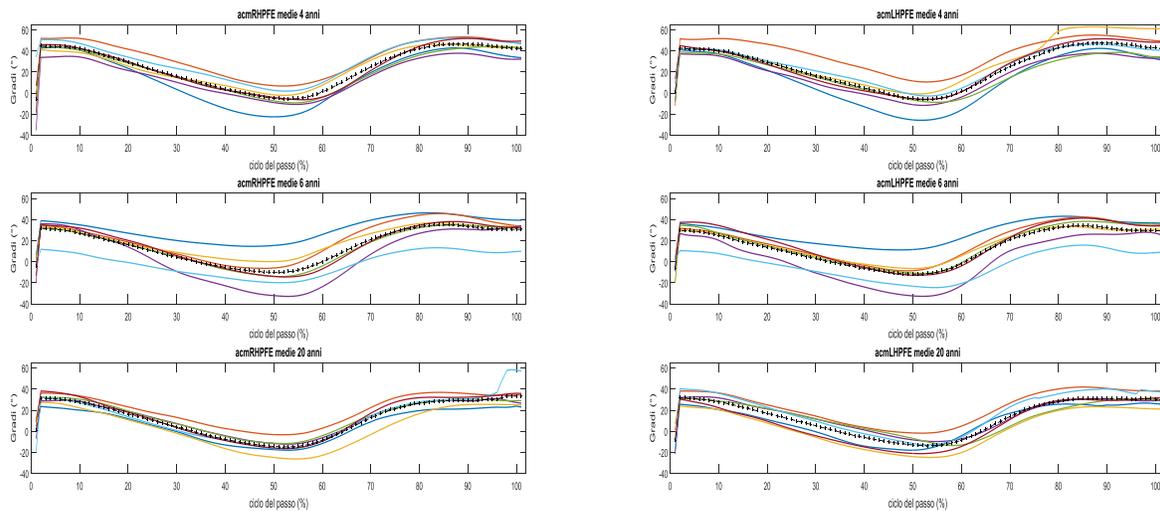


Figura 26 - Valore medio dell'angolo di flessione-estensione dell'anca (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto. La linea nera (asterischi) rappresenta la media dei soggetti del gruppo

L'andamento delle medie mostra una leggera diminuzione della variabilità con l'età del gruppo.

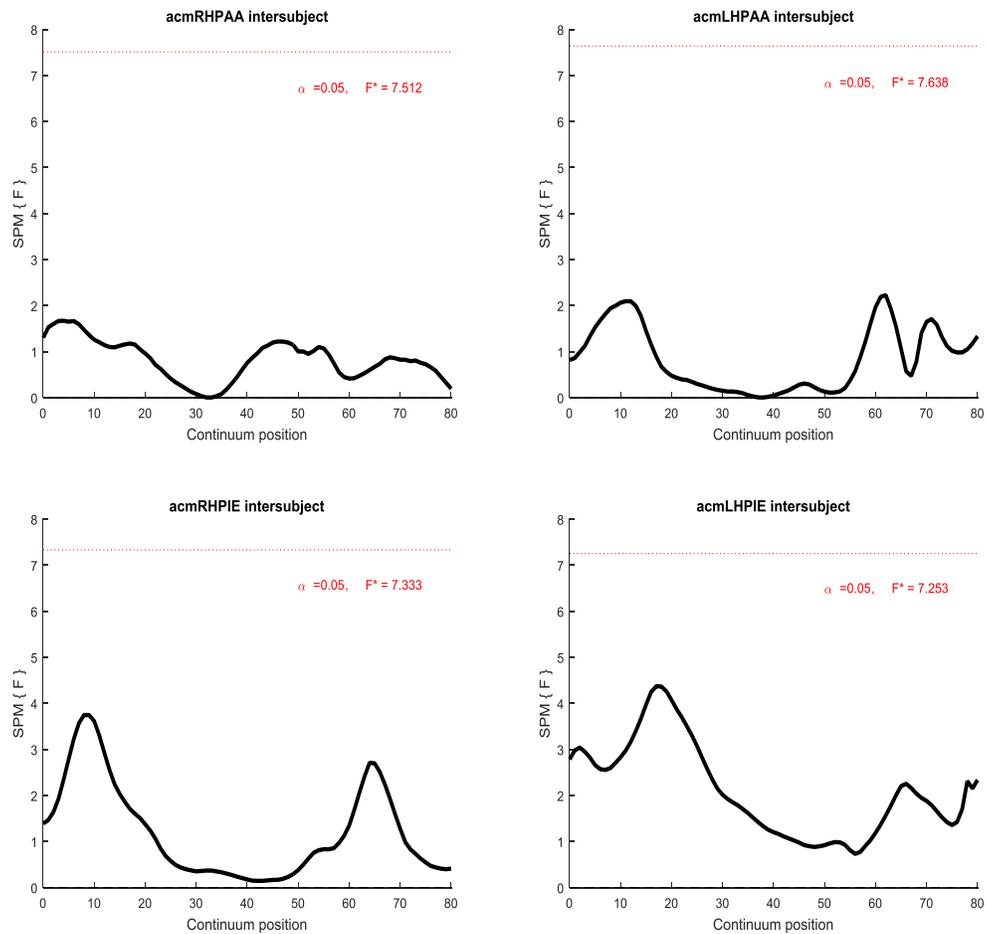


Figura 27 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject degli angoli di abd- adduzione e intra-extra rotazione dell'anca, dx e sx

L'analisi statistica di abd-adduzione ed intra-extra rotazione dell'anca non ha mostrato un effetto significativo dell'età sulla variabilità Inter-subject.

PELVI

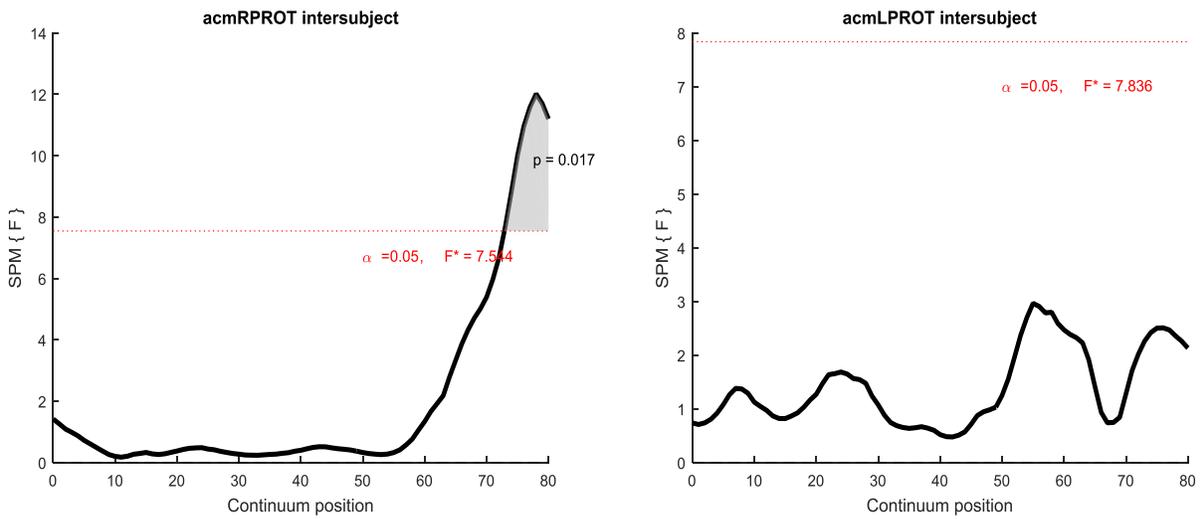


Figura 28 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject dell'angolo di rotazione pelvica, dx e sx

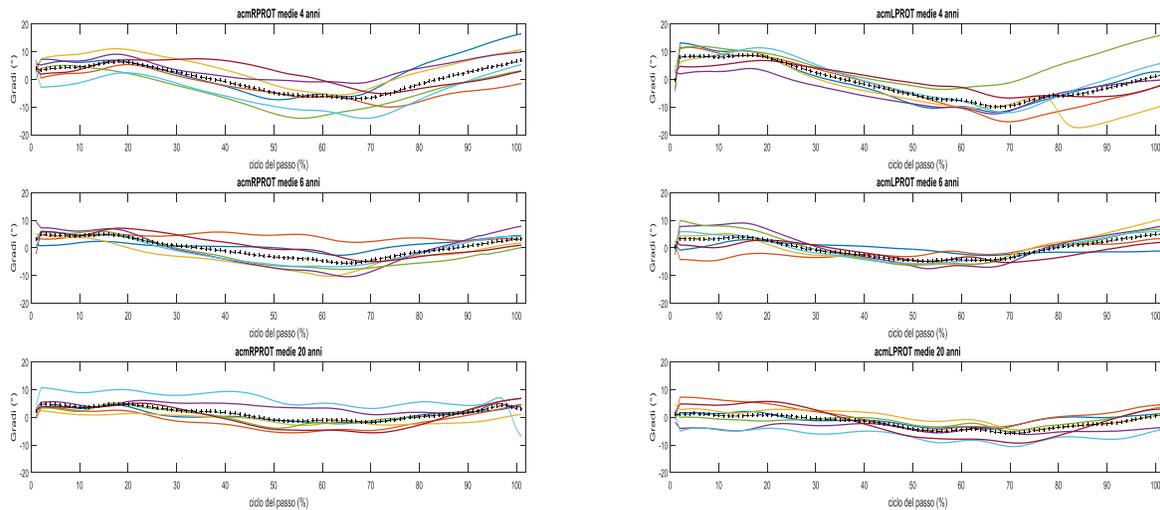


Figura 29 - Valore medio dell'angolo di rotazione pelvica (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto. La linea nera (asterischi) rappresenta la media dei soggetti del gruppo

L'analisi statistica della rotazione pelvica mostra notevole diversità nella fase di Terminal-Swing specialmente per la parte destra. I grafici delle medie mostrano pattern simili tra i soggetti del gruppo già dai 6 anni, mentre tra i 4 vi è ancora molta divergenza.

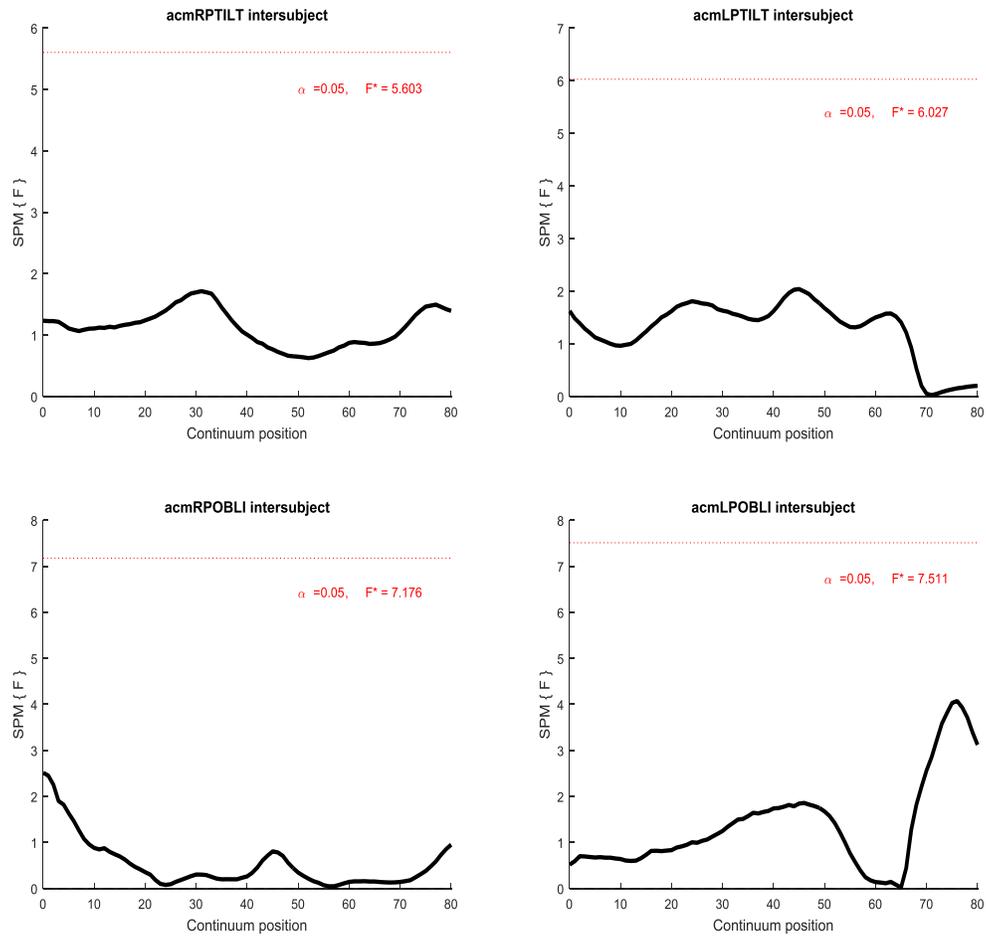


Figura 30 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-subject degli angoli di tilt pelvico e obliquità pelvica, dx e sx

L'ANOVA non mostra effetto significativo dell'età sulla variabilità di tilt pelvico e obliquità pelvica.

3.2 Intra-subject

Per l'analisi Intra-subject sono state prese in considerazione le deviazioni standard sulle 5 prove di ogni soggetto (secondo blocco di camminate) rispettivamente per il CoM e per gli angoli articolari. La variabilità cinematica durante le 5 camminate consecutive del centro di massa nei bambini è risultata non essere statisticamente diversa da quella degli adulti, mentre quella di alcuni angoli articolari è risultata maggiore (l'ANOVA ha mostrato effetto dell'età). In particolar modo la variabilità degli angoli di anca e pelvi mostra una differenza significativa tra i gruppi.

COM

La variabilità del centro di massa è risultata costante lungo tutto il ciclo del passo, con picchi minimi all'altezza dello Swing iniziale, non mostrando differenza significativa fra i tre gruppi. L'asse maggiormente interessato da differenza tra i gruppi è il medio-laterale, anche se tale differenza non è significativa: la deviazione standard relativa a questo asse, per i 4 ed i 6 anni, ha presentato variabilità superiore rispetto a quella degli adulti. Lungo l'asse anteroposteriore si nota una calo significativo della variabilità tra la fascia di età dei 4 e quella dei 6 anni, con questi ultimi che si mostrano essere molto simili agli adulti sul piano sagittale.

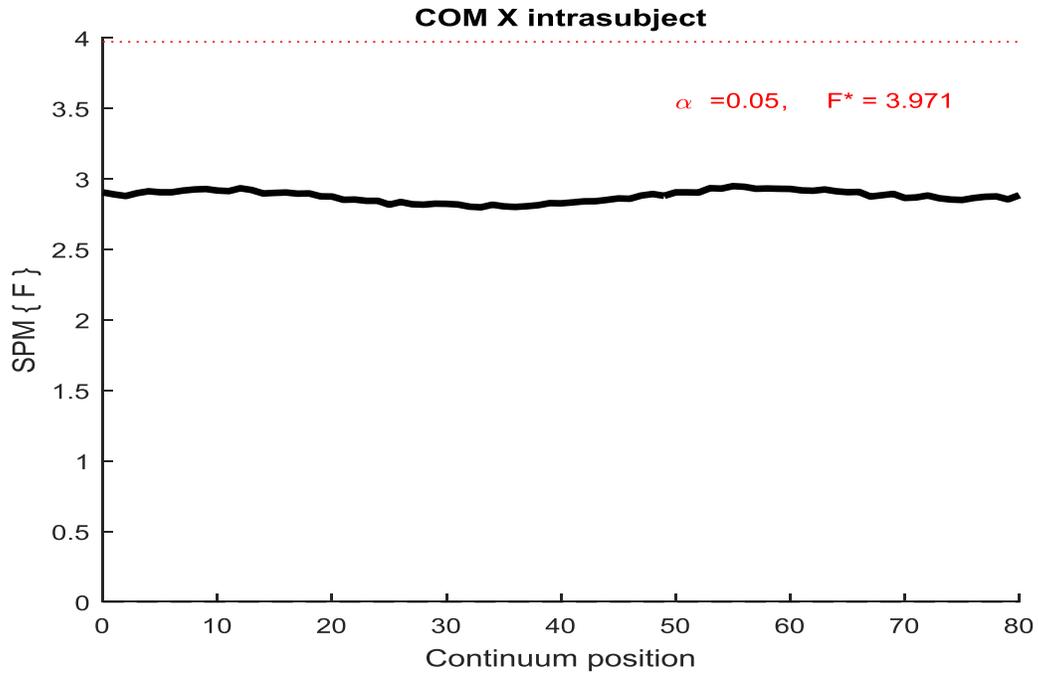


Figura 31 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject della traiettoria del centro di massa, asse medio-laterale

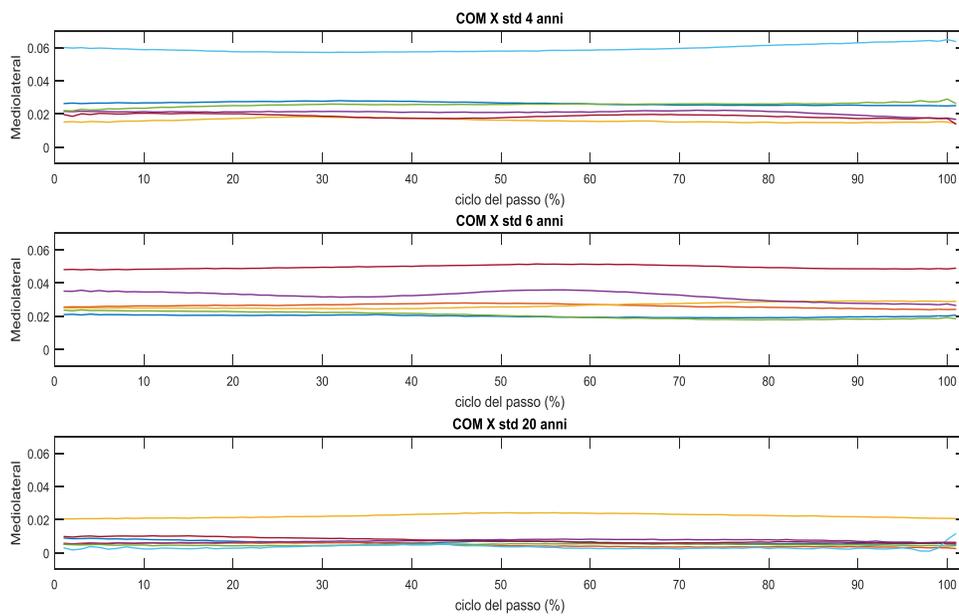


Figura 32 - Deviazione standard della traiettoria del centro di massa lungo l'asse medio-laterale durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

La variabilità dei tre gruppi è simile e costante lungo il ciclo del passo.

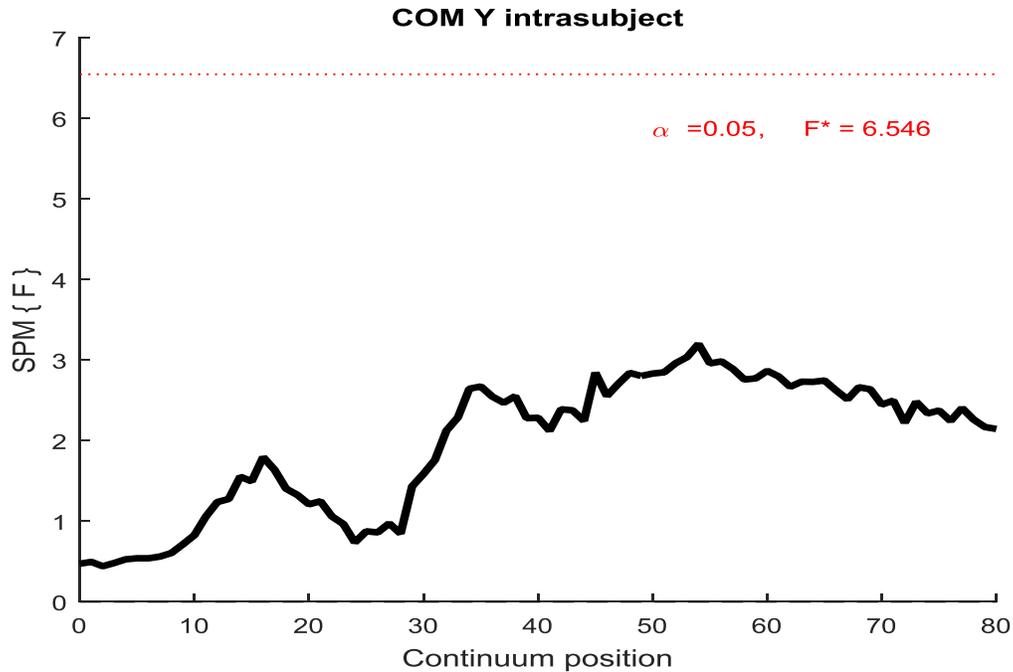


Figura 33 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject della traiettoria del centro di massa, asse verticale

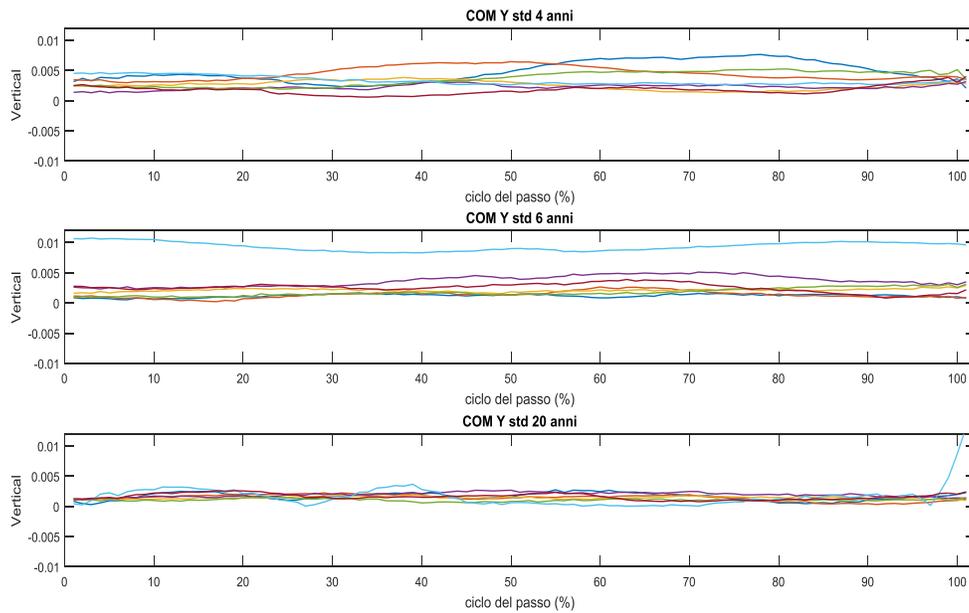


Figura 34 - Deviazione standard della traiettoria del centro di massa lungo l'asse verticale durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

Lungo l'asse verticale si può osservare che la variabilità della traiettoria del centro di massa diminuisce con l'aumentare dell'età. Tuttavia il risultato non è statisticamente significativo e i tre gruppi non sono significativamente diversi.

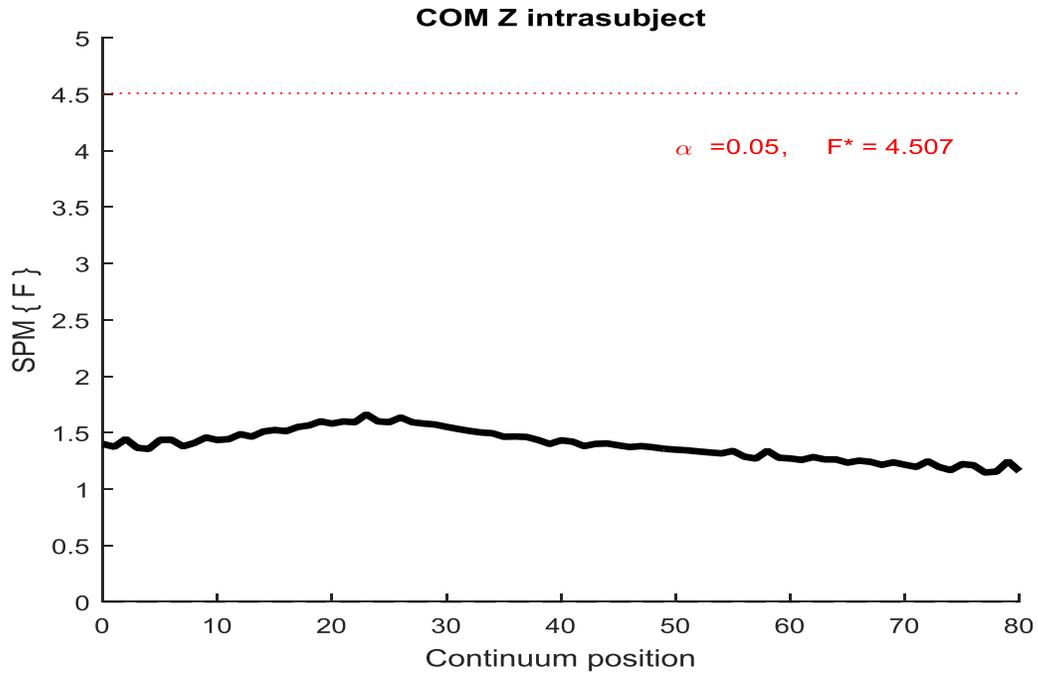


Figura 35 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject della traiettoria del centro di massa, asse anteroposteriore

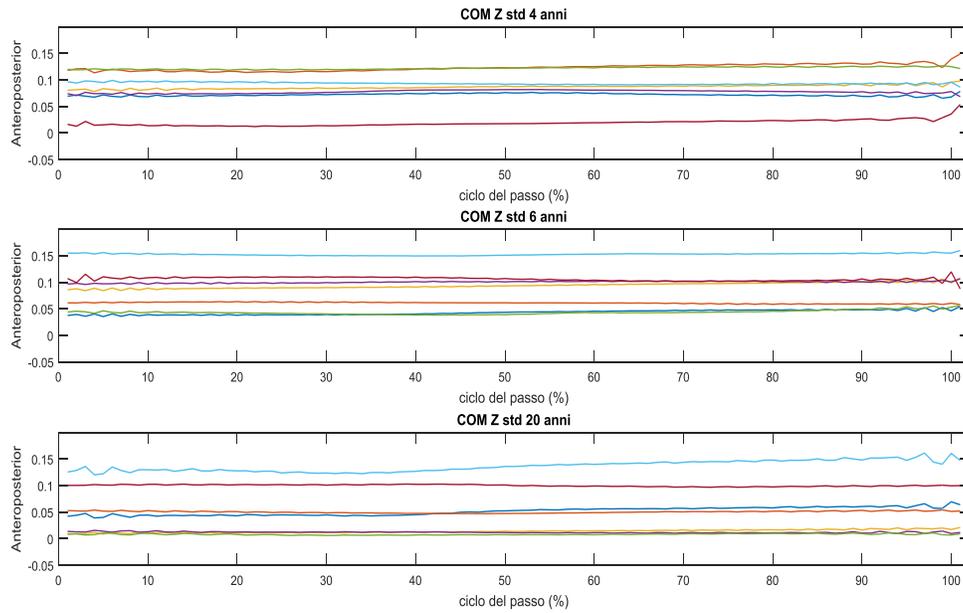


Figura 36 - Deviazione standard della traiettoria del centro di massa lungo l'asse anteroposteriore durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

L'analisi del CoM lungo l'asse anteroposteriore non mostra elevata variabilità, i grafici delle deviazioni standard risultano simili per tutte e tre le fasce di età.

ANGOLI

Gli angoli articolari mostrano variabilità Intra-subject maggiore nei bambini rispetto agli adulti. In particolar modo sono risultate significative le differenze nei movimenti di rotazione pelvica, flessione-estensione e abd-adduzione dell'anca. Si nota grande variabilità (statisticamente significativa) anche per quanto concerne la flessione-estensione del ginocchio e l'intra-extra rotazione della caviglia. Si può osservare che i risultati degli angoli di ginocchio del gruppo dei 6 anni sono molto vicini al gruppo degli adulti.

CAVIGLIA

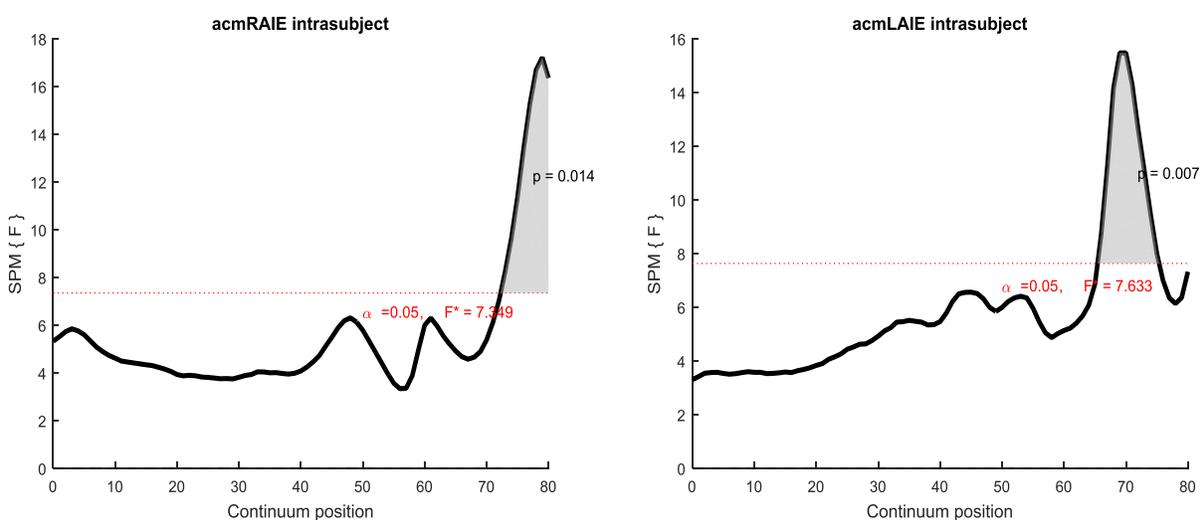


Figura 37 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di intra-extra rotazione della caviglia, dx e sx

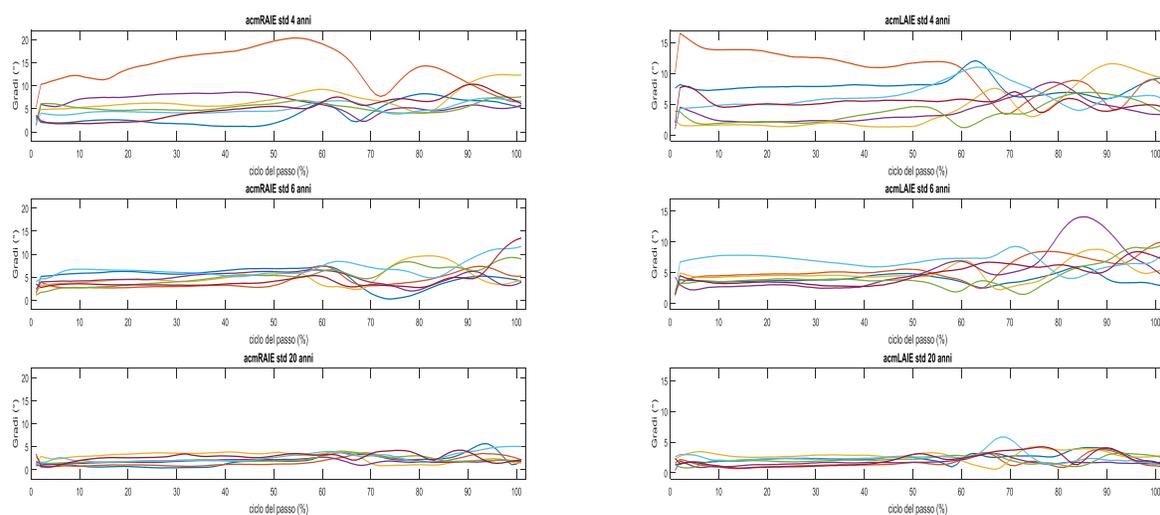


Figura 38 - Deviazione standard dell'angolo di intra-extra rotazione della caviglia (dx e sx) durante un ciclo del passo

L'analisi statistica degli angoli articolari della caviglia ha mostrato elevata variabilità nel movimento di intra-extra rotazione, con picco nella fase di Mid-Swing, nel passaggio dall'accelerazione alla decelerazione. Attraverso i grafici delle deviazioni standard si può notare come il gruppo dei 4 anni risulti molto variabile lungo tutto il ciclo del passo, mentre i 6 anni mostrano una variabilità intermedia, più simile agli adulti nella fase di Stance, più simile al gruppo di 4 anni in quella di Swing, in maniera simile per l'arto destro e sinistro.

Gli angoli calcolati dal movimento di flessione-estensione confermano quanto detto, ma presentano una variabilità globalmente minore.

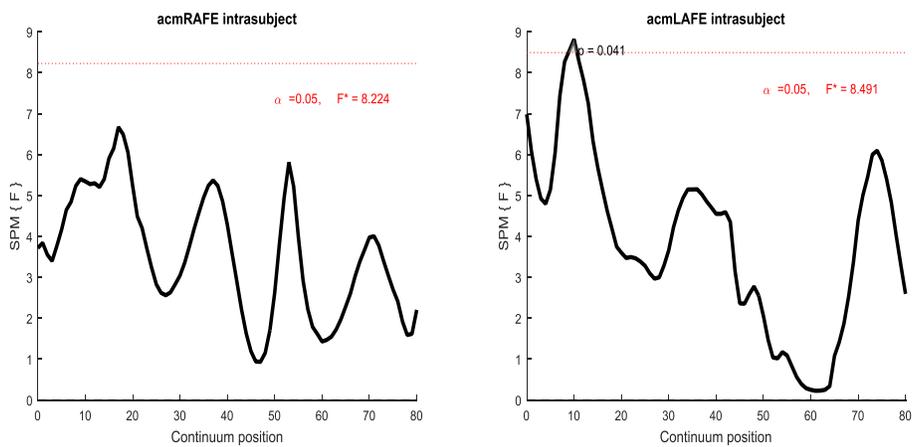


Figura 39 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di flessione-estensione della caviglia, dx e sx

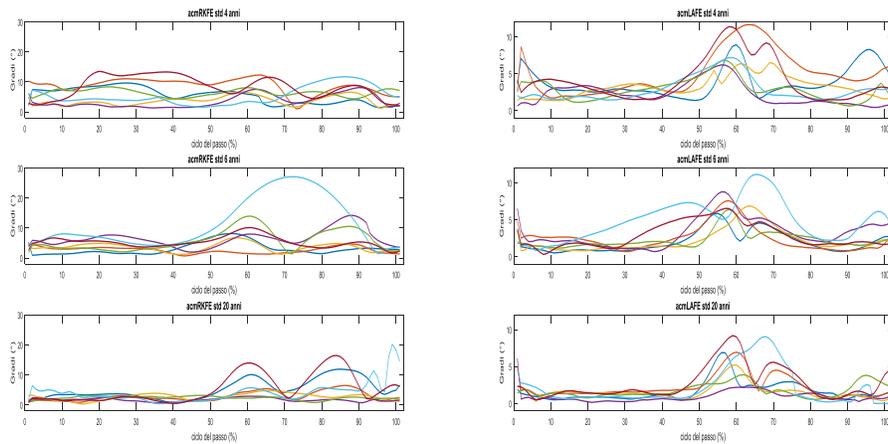


Figura 40 - Deviazione standard dell'angolo di flessione-estensione della caviglia (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

GINOCCHIO

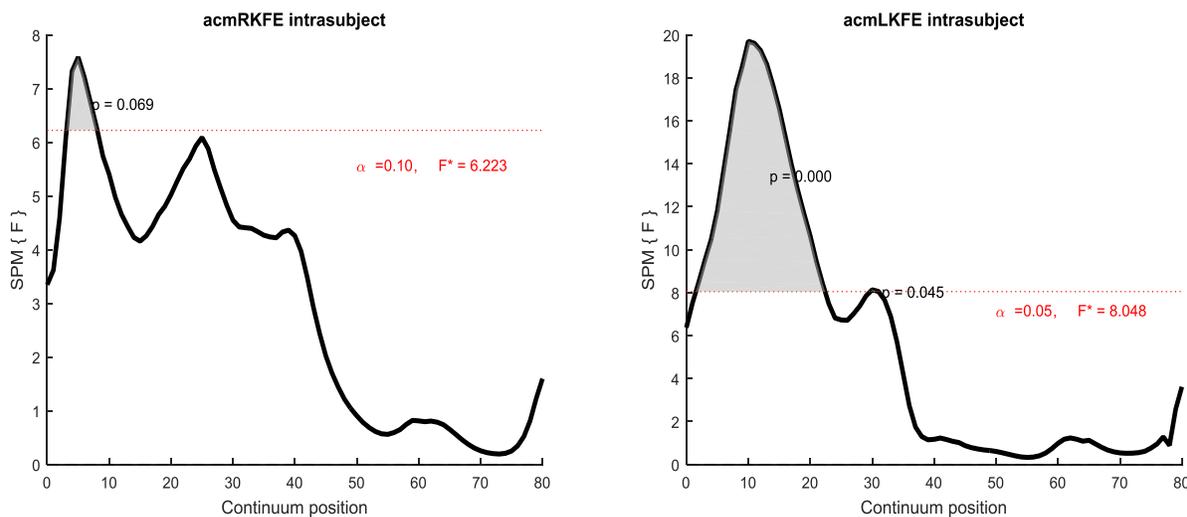


Figura 41 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di flesso-estensione del ginocchio, dx e sx

Le curve generate dall'ANOVA per la flesso-estensione del ginocchio risultano essere molto variabili nella prima parte del ciclo del passo, mentre non si evidenzia differenza statistica nella seconda. Tutta la fase di Stance è caratterizzata da differenze molto marcate nella variabilità Intra-subject.

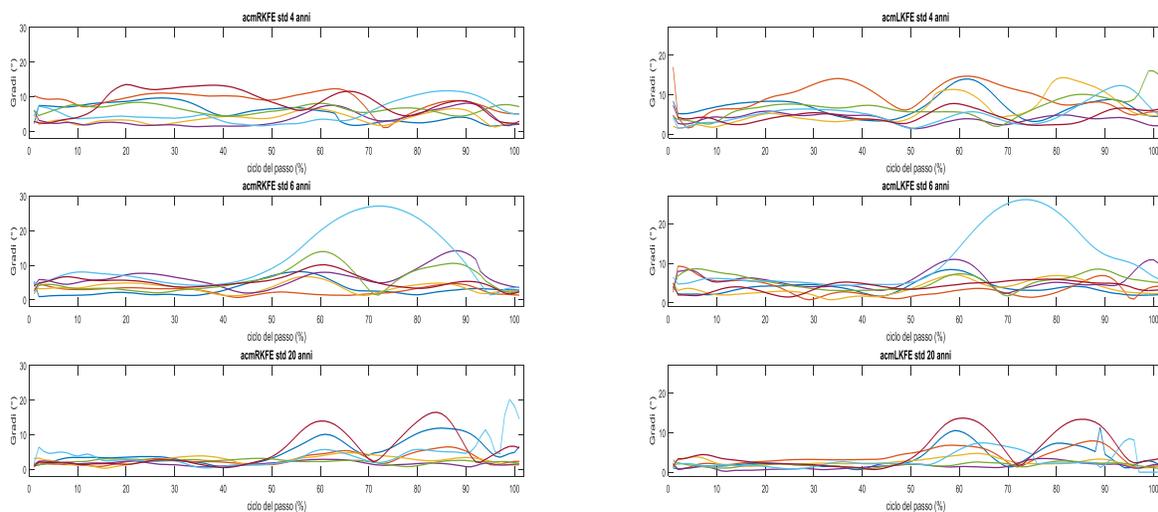


Figura 42 - Deviazione standard dell'angolo di flesso-estensione del ginocchio (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

Dai grafici delle deviazioni standard le divergenze risultano vistose in particolar modo nei bambini di 4 anni, mentre già dai 6 si può notare un avvicinamento alla variabilità degli adulti.

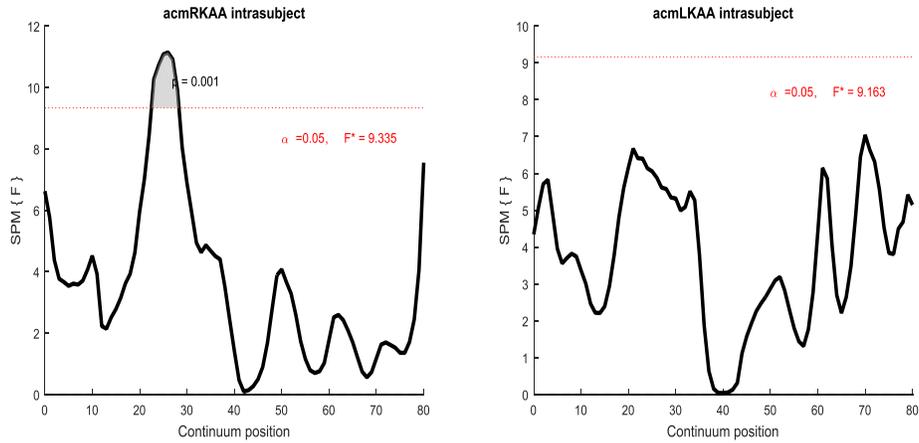


Figura 43 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di abd-adduzione del ginocchio, dx e sx

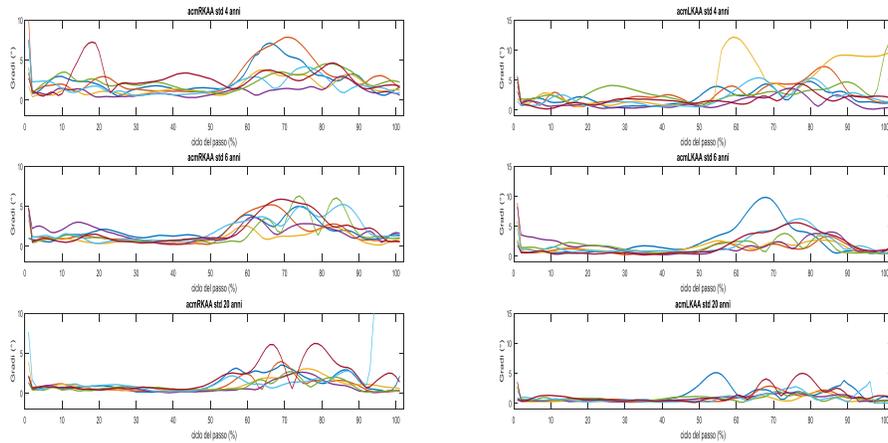


Figura 44 - Deviazione standard dell'angolo di abd-adduzione del ginocchio (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

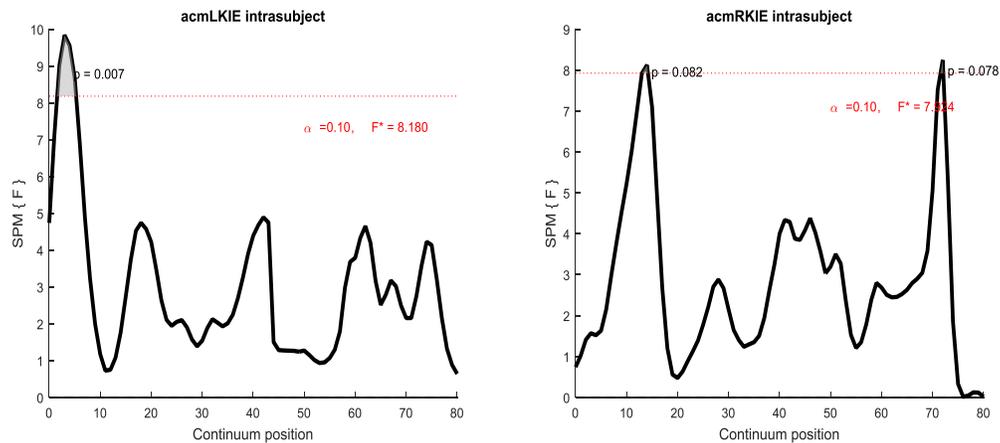


Figura 45 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di intra-extra rotazione del ginocchio, dx e sx

L'analisi sull'abd-adduzione e sull'intra-extra rotazione del ginocchio confermano quanto detto per la flessione-estensione, pur risultando diversi significativamente solo in brevissime fasi del passo.

ANCA

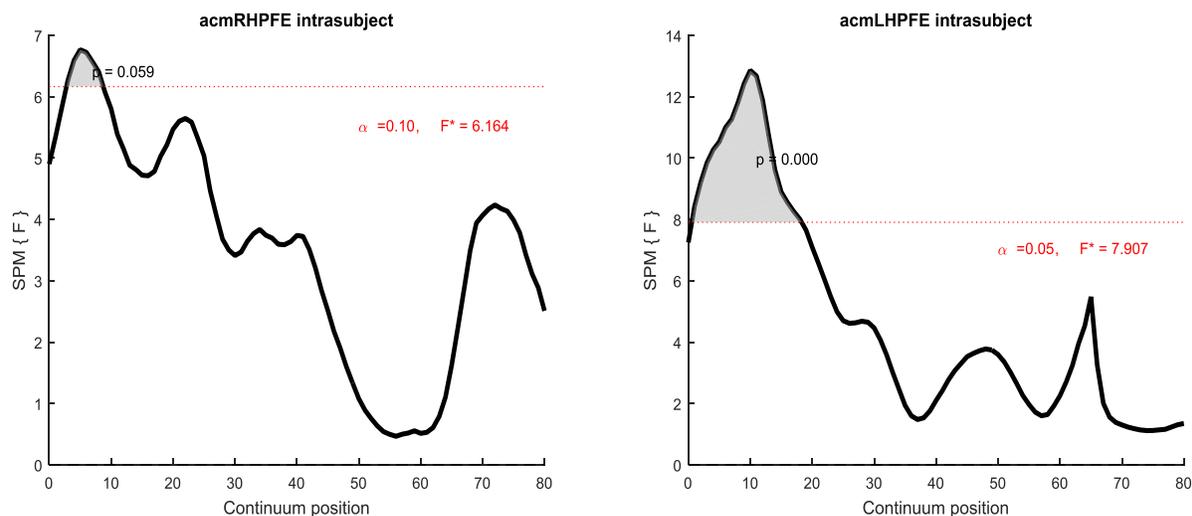


Figura 46 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di flessione-estensione dell'anca, dx e sx

La flessione-estensione dell'anca mostra una differenza statistica fra i gruppi con effetto dell'età nella fase iniziale del ciclo del passo, all'altezza del Loading Response. Questa divergenza risulta ben visibile sia sul lato destro che sinistro.

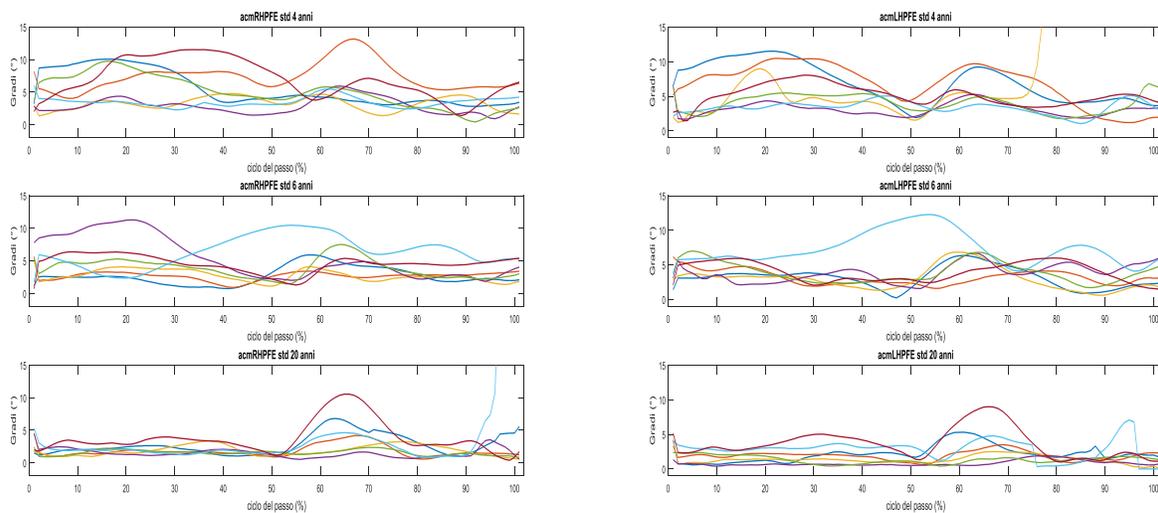


Figura 47 - Deviazione standard dell'angolo di flessione-estensione dell'anca (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

L'osservazione dei grafici delle std conferma quanto visto attraverso l'ANOVA: sia i 4 che i 6 anni presentano valori di variabilità anche 5 volte superiori degli adulti nella fase di Stance, con minimo assetto in fase di Swing.

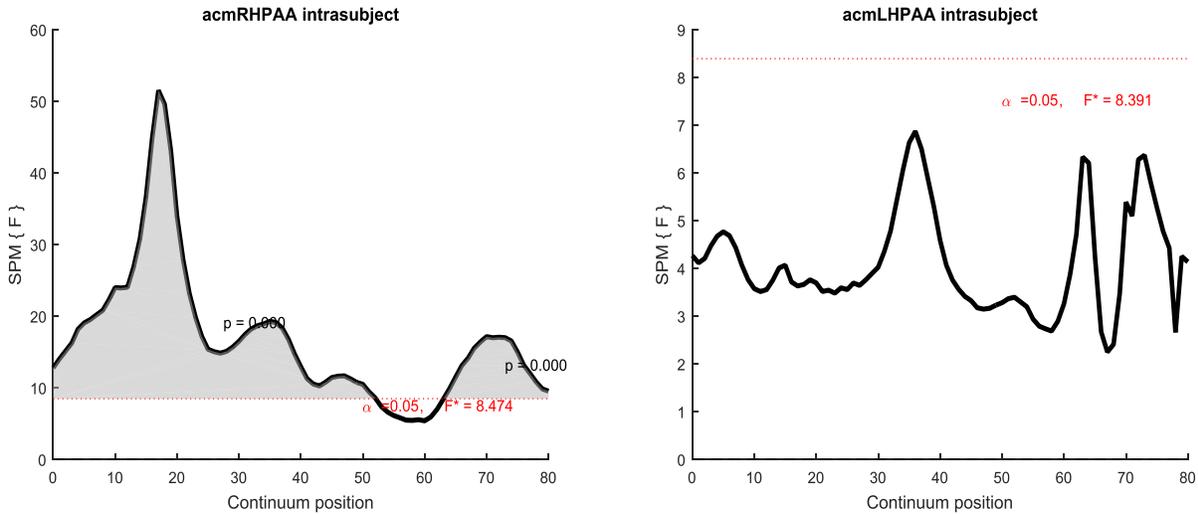


Figura 48 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di abd-adduzione dell'anca, dx e sx

In abd-adduzione si evince la massima divergenza statistica per quanto concerne gli angoli articolari dell'anca. Si osserva effetto dell'età sulla variabilità dell'angolo dell'anca destra mentre non si osserva effetto su quello di sinistra. Sarà necessario investigare e controllare tutti i dati per verificare la motivazione di tale risultato.

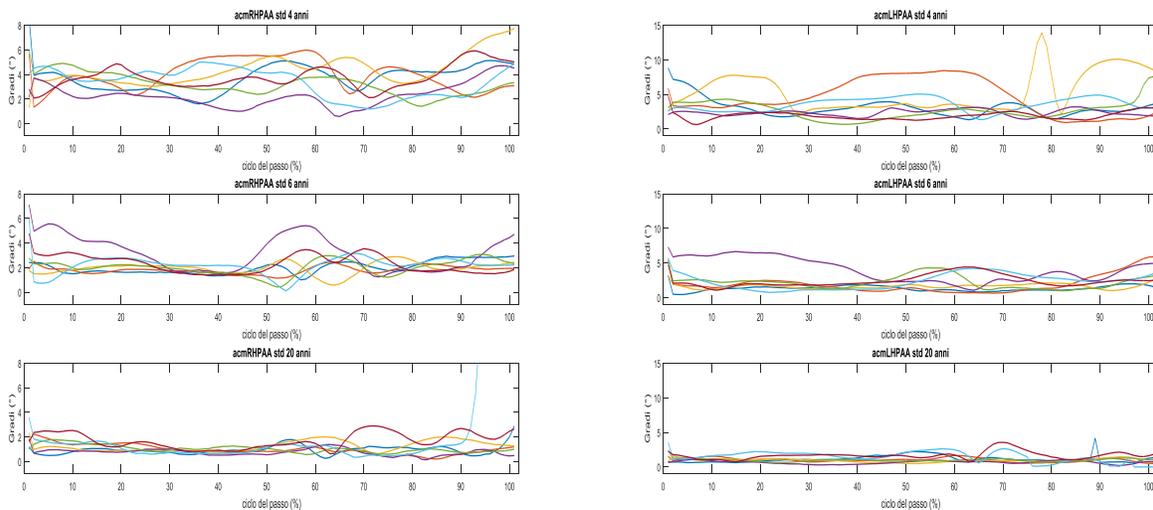


Figura 49 - Deviazione standard dell'angolo di abd-adduzione dell'anca (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

I grafici delle deviazioni standard confermano variabilità molto marcata per tutti i bambini, nei 4 anni le curve sono stabilmente diverse lungo tutto il ciclo del passo, nei 6 anni è però visibile una minor variabilità, più simile agli adulti tra il Mid-Stance e l'Heel-Off.

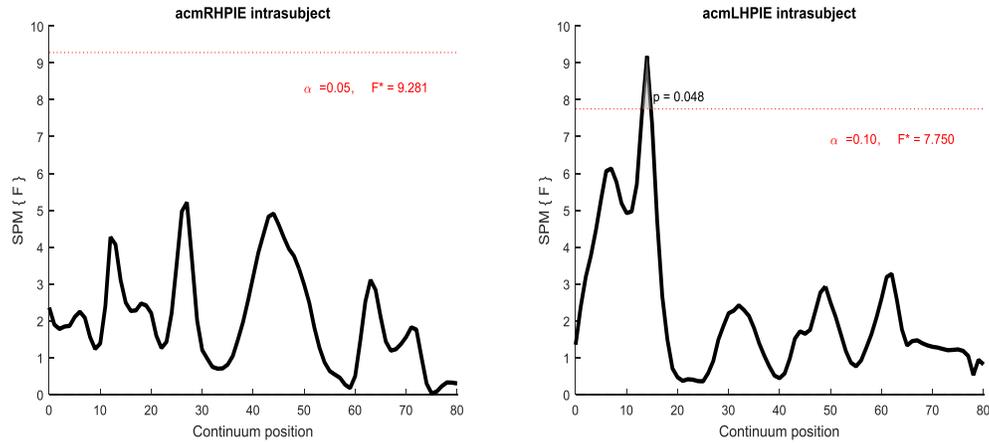


Figura 50 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di intra-extra rotazione dell'anca, dx e sx

L'analisi statistica del movimento di intra-extra rotazione non mostra effetto significativo dell'età sui tre gruppi.

PELVI

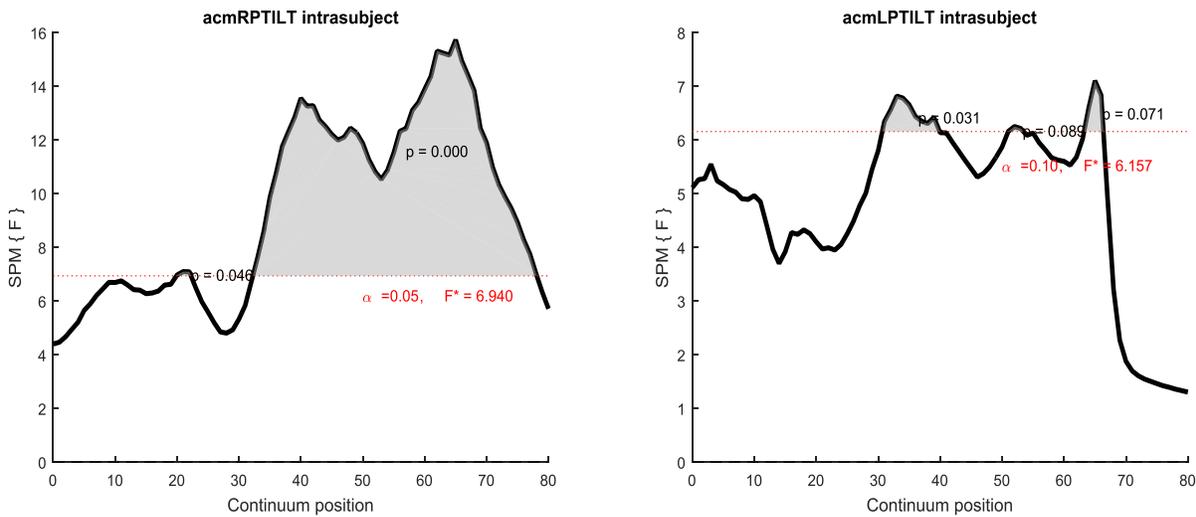


Figura 51 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di tilt pelvico, dx e sx

L'analisi della varianza effettuata sull'angolo di tilt-pelvico presenta un'elevata variabilità lungo tutto il ciclo del passo. La fase maggiormente interessata da differenze statistiche è quella dello Swing, con valori di picco anche doppi rispetto al valore di soglia. La parte destra risulta essere più interessata da divergenze rispetto alla sinistra. Si nota un calo nei grafici in concomitanza con l'inizio della decelerazione.

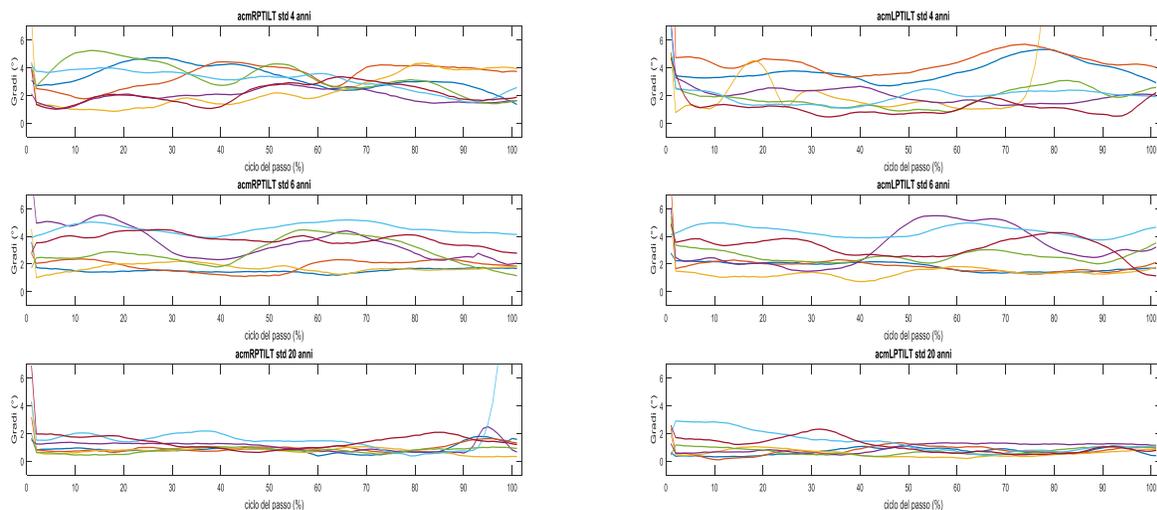


Figura 52 - Deviazione standard dell'angolo di tilt pelvico (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

Le curve di deviazione standard mostrano una elevata differenza tra il gruppo dei bambini, comprensivo di 4 e 6 anni, e quello degli adulti: la variabilità risulta essere fino a 4/5 volte maggiore, lungo l'intero ciclo del passo.

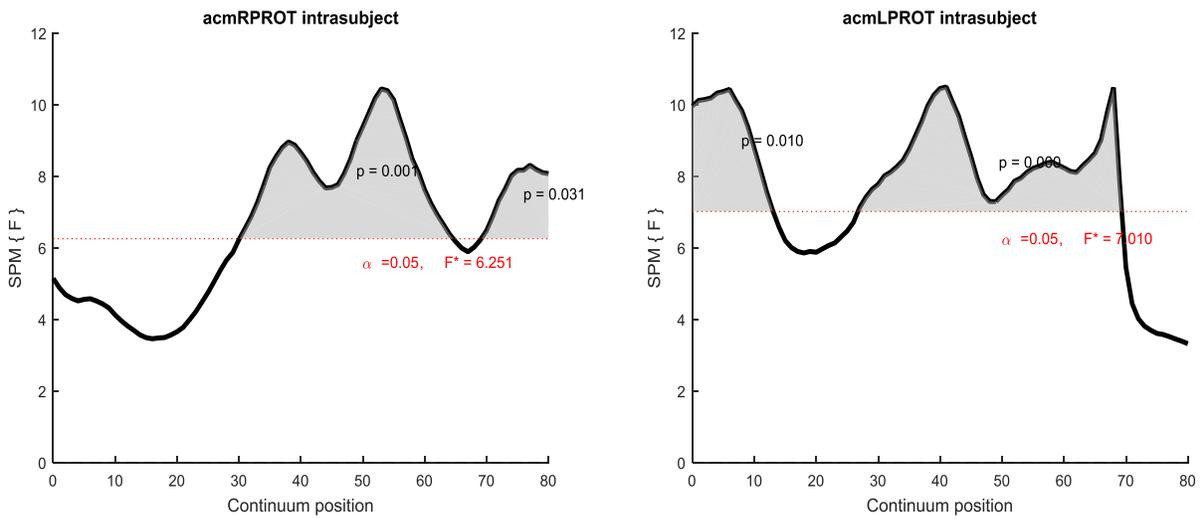


Figura 53 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di rotazione pelvica, dx e sx

L'angolo di rotazione pelvica è risultato molto variabile nei bambini rispetto agli adulti: presenta differenze significative sia a destra che a sinistra su quasi tutto il ciclo del passo.

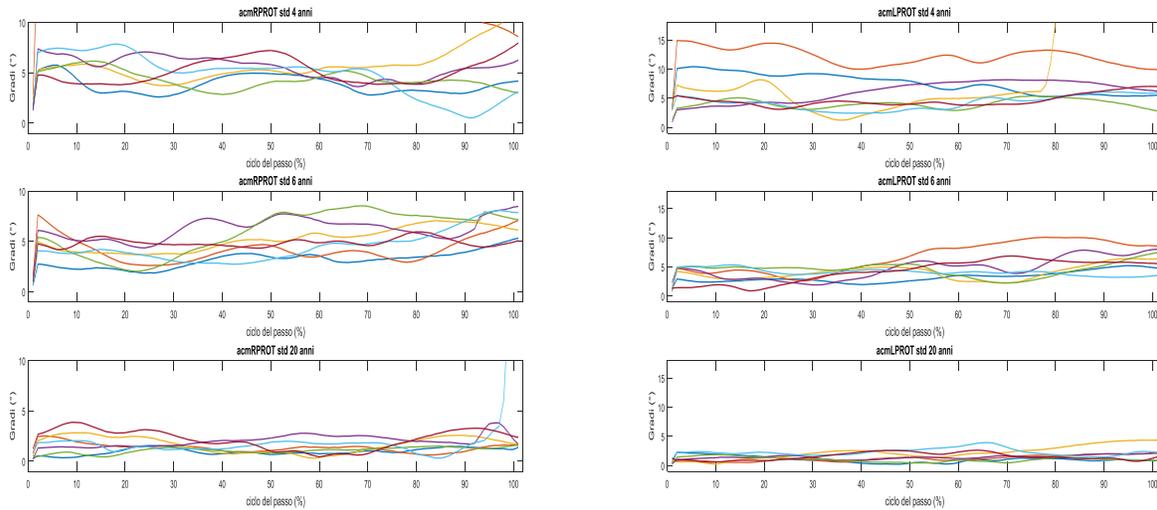


Figura 54 - Deviazione standard dell'angolo di rotazione pelvica (dx e sx) durante un ciclo del passo per ciascun soggetto

I grafici delle standard deviation mostrano differenze significative in ogni fase del ciclo, con differenze anche di ordine 7/8 volte maggiore tra bambini di 4 anni ed adulti. Si può osservare il decremento di variabilità tra 4 anni, 6 anni e adulti.

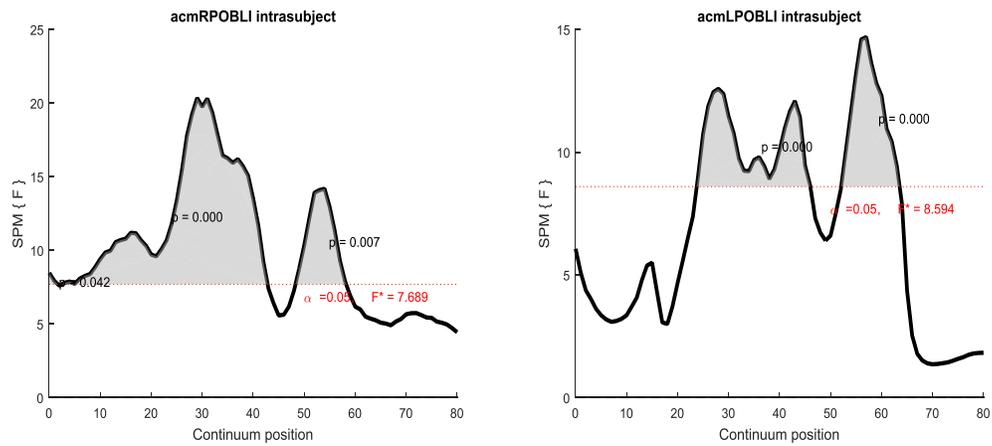


Figura 55 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-subject dell'angolo di obliquità pelvica, dx e sx

Gli angoli di obliquità pelvica mostrano effetto dell'età sulla variabilità Intra-subject: le curve risultanti dal test ANOVA SMP1D risultano quasi sempre sopra la soglia del 5%.

3.3 Inter-test

Per l'analisi in Inter-test è stata presa in considerazione la variabilità tra le tre prove di camminate sia per le traiettorie del centro di massa sia per gli angoli articolari. Lo scopo è stato quello di valutare la somiglianza statistica tra i tre blocchi, cioè quanto ogni soggetto è ripetibile nel cammino se viene fermato e distratto per poi riprendere a camminare. La variabilità cinematica tra le tre prove è risultata essere molto minore per il centro di massa rispetto a quelle degli angoli articolari.

Viene riportato, sia per il CoM che per gli angoli articolari, un grafico esemplificativo di tre soggetti: un bambino di 4 anni, un bambino di 6 anni ed un adulto.

COM

L'analisi della variabilità della traiettoria del centro di massa ha mostrato un andamento molto simile tra i tre piani anatomici per i tre gruppi, più di quanto già visto in condizione di Intra-subject ed Inter-subject. La variabilità risultante è stata pressoché identica tra le diverse fasce di età, non mostrando effetto statistico.

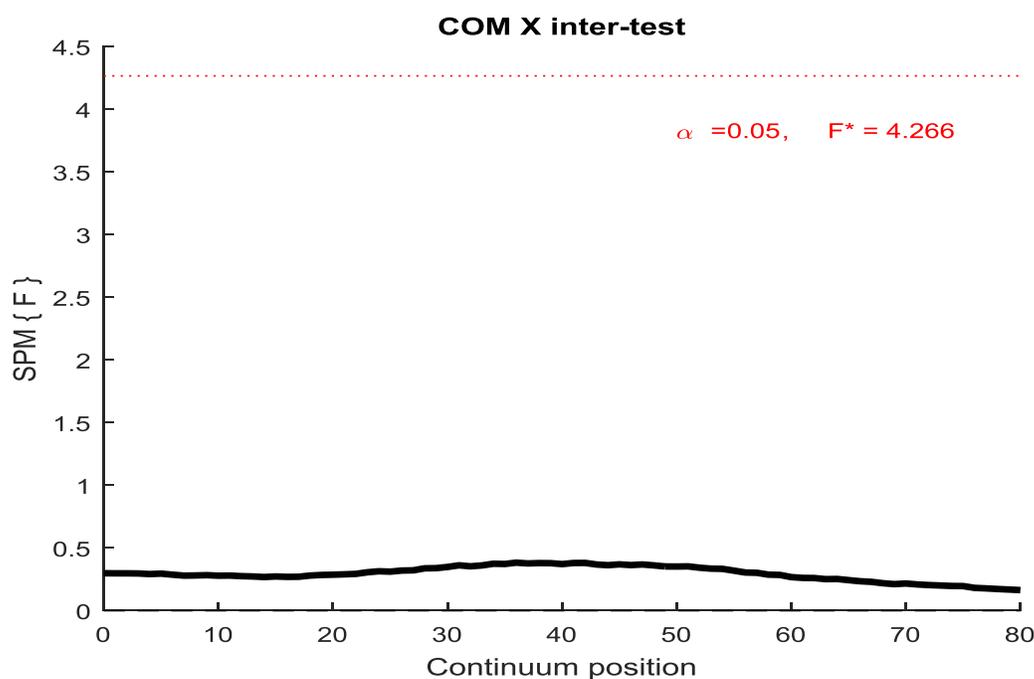


Figura 56 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-test della traiettoria del centro di massa, asse medio-laterale

L'analisi della varianza mostra come le deviazioni standard relative ai tre blocchi di camminate siano statisticamente molto simili lungo tutto il piano medio-laterale.

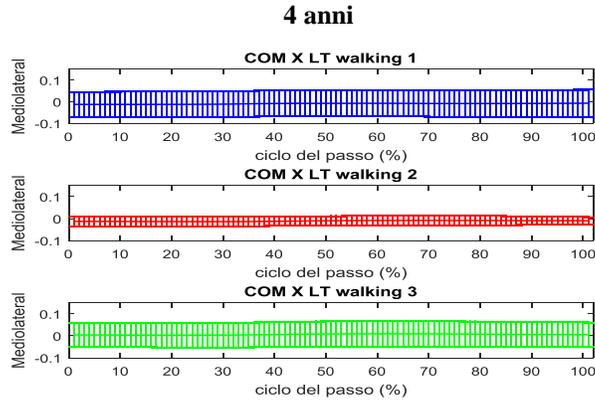


Figura 57 - Traiettoria della media \pm deviazione standard del centro di massa lungo l'asse medio-laterale durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 4 anni

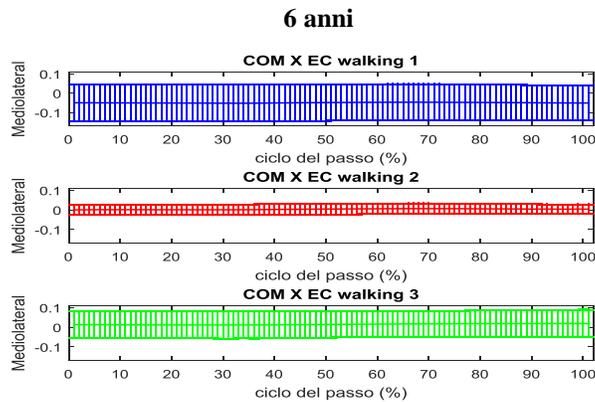


Figura 58 - Traiettoria della media \pm deviazione standard del centro di massa lungo l'asse medio-laterale durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 6 anni

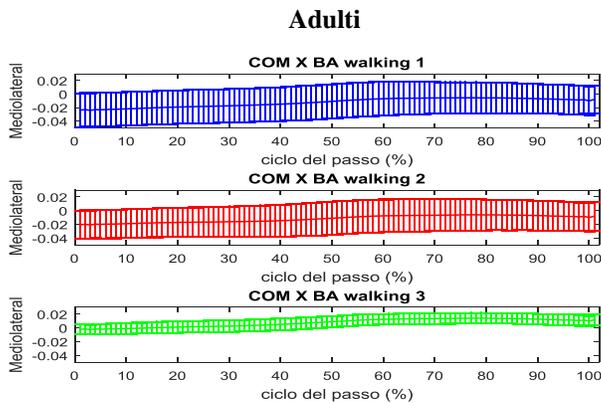


Figura 59 - Traiettoria della media \pm deviazione standard del centro di massa lungo l'asse medio-laterale durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto adulto

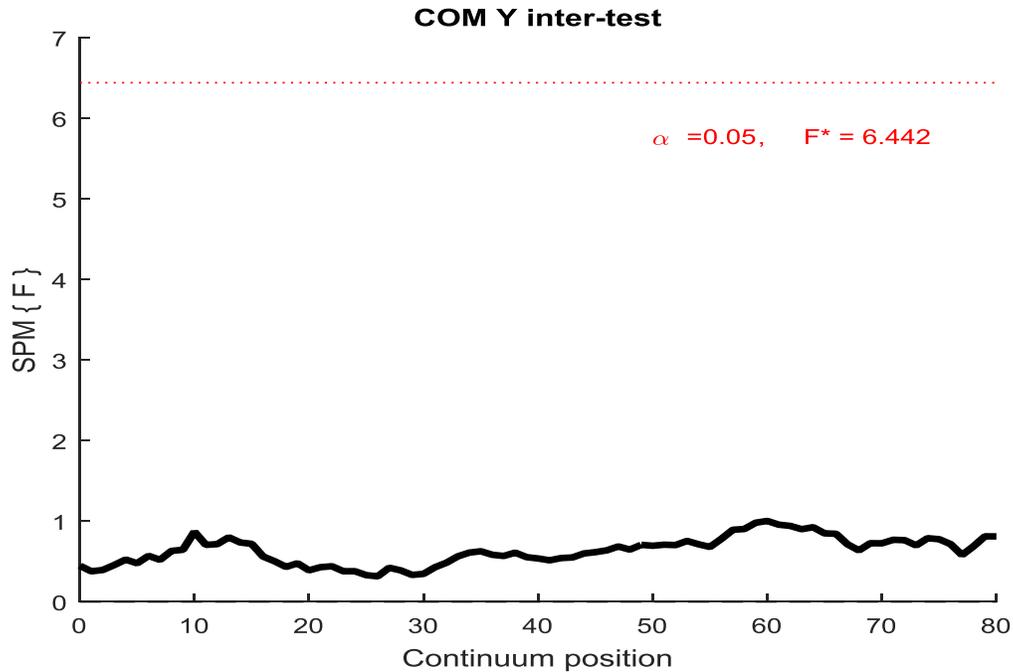


Figura 60 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-test della traiettoria del centro di massa, asse verticale

L'ANOVA ad un criterio effettuata sul centro di massa lungo l'asse verticale conferma la minima differenza di variabilità Inter-test tra i 3 gruppi di soggetti. L'andamento è costante lungo tutto il ciclo del passo, e sempre abbondantemente sotto soglia.

Attraverso i grafici dei singoli blocchi di camminate si evince un andamento pressoché analogo tra le traiettorie di adulti e bambini.

4 anni

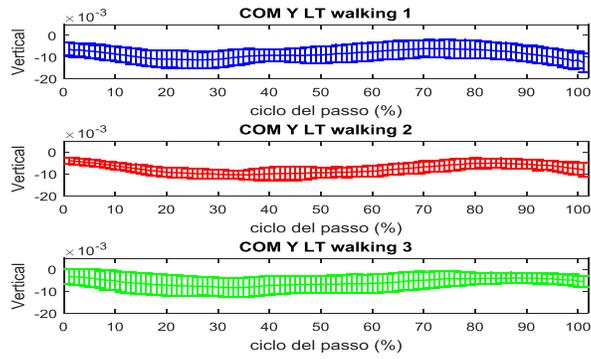


Figura 61 - Traiettoria della media \pm deviazione standard del centro di massa lungo l'asse verticale durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 4 anni

6 anni

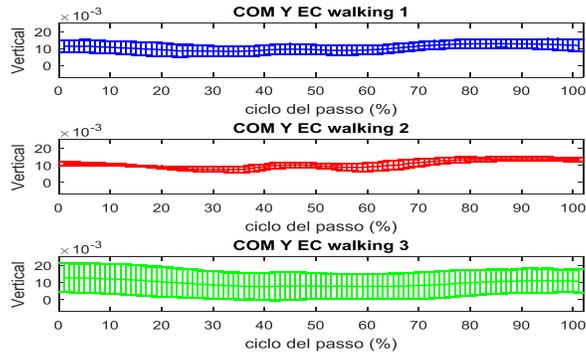


Figura 62 - Traiettoria della media \pm deviazione standard del centro di massa lungo l'asse verticale durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 6 anni

Adulti

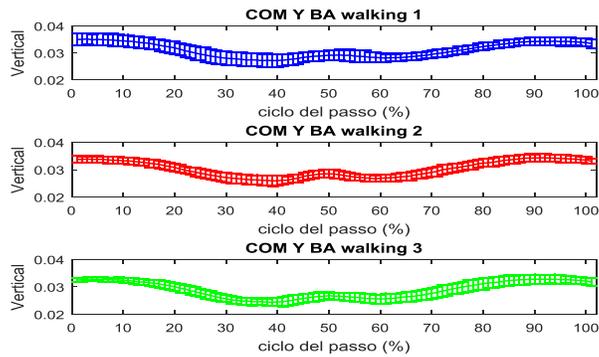


Figura 63 - Traiettoria della media \pm deviazione standard del centro di massa lungo l'asse verticale durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto adulto

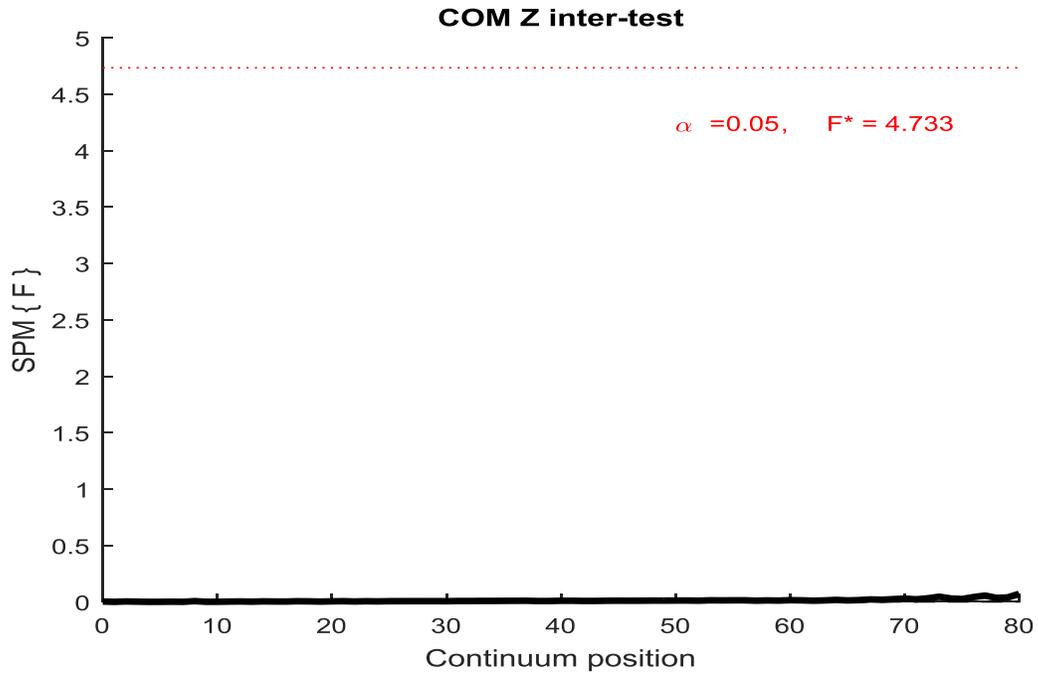


Figura 64 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità inter-test della traiettoria del centro di massa, asse anteroposteriore

La statistica effettuata sulle deviazioni standard totali relative ai 3 blocchi di camminate sull'asse anteroposteriore mostra una divergenza particolarmente bassa tra le fasce di età in oggetto, non evidenziando un effetto significativo dell'età.

Le curve con medie e deviazioni standard risultano molto simili lungo il piano sagittale in particolar modo nei bambini di 4 anni.

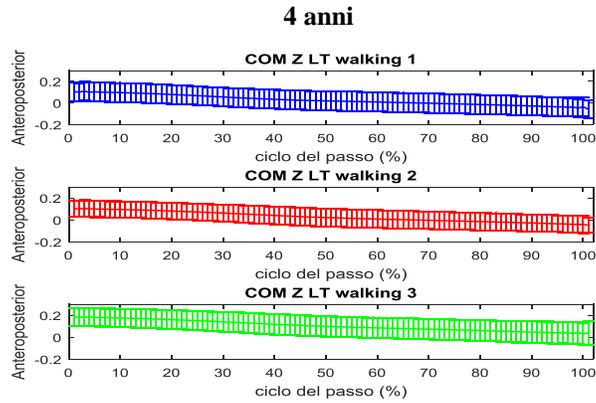


Figura 65 - Traiettoria della media \pm deviazione standard del centro di massa lungo l'asse anteroposteriore durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 4 anni

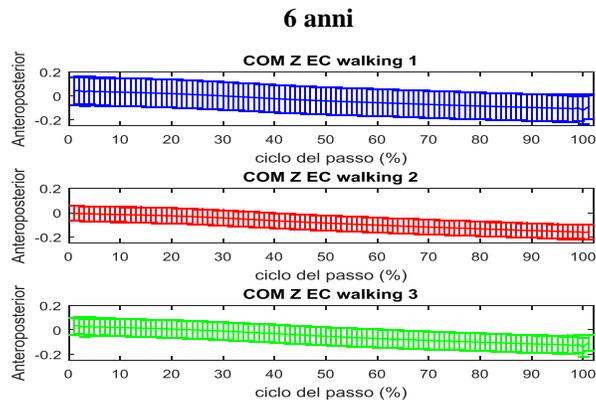


Figura 66 - Traiettoria della media \pm deviazione standard del centro di massa lungo l'asse anteroposteriore durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 6 anni

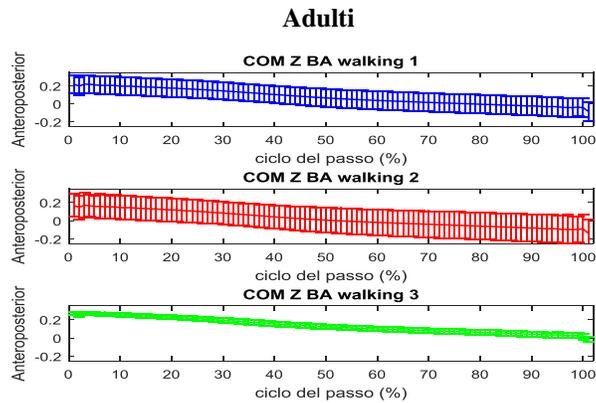


Figura 67 - Traiettoria della media \pm deviazione standard del centro di massa lungo l'asse anteroposteriore durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto adulto

ANGOLI

Per quanto concerne i segmenti corporei è stata osservata, durante prove ripetute e intervallate da una pausa (inter-test), una variabilità proporzionalmente inferiore a quelle trovate in Inter-subject ed Intra-subject. Gli angoli articolari distali sono risultati statisticamente i più variabili nei bambini, in particolar modo quelli relativi alla flessione-estensione della caviglia e del ginocchio. L'ANOVA ha mostrato un effetto significativo dell'età solo in pochi casi e in brevi fasi del passo. Nei segmenti prossimali come l'anca e la pelvi non sono state riscontrate differenze.

CAVIGLIA

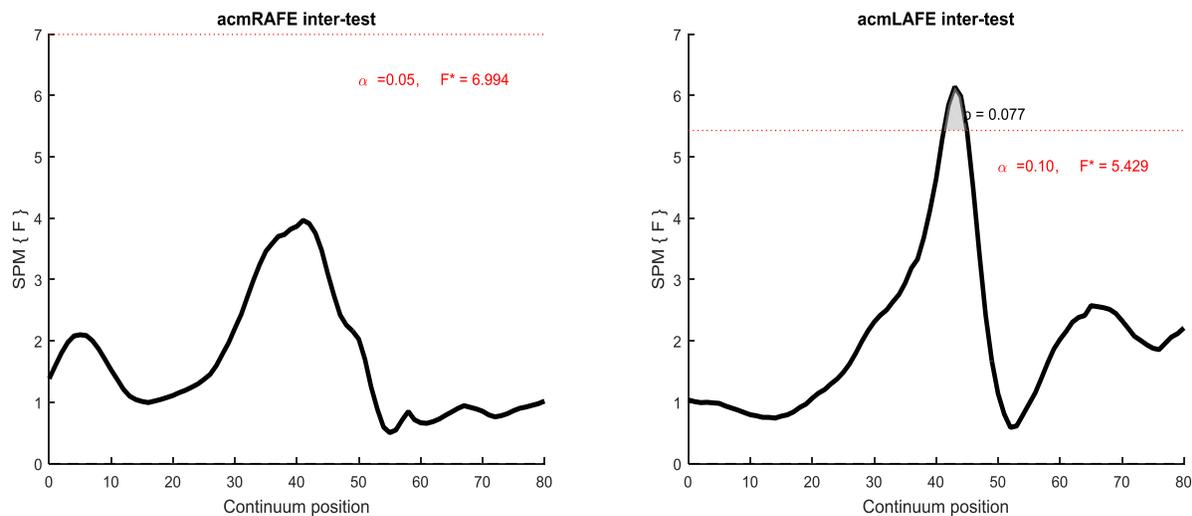


Figura 68 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-test dell'angolo di flessione-estensione della caviglia, dx e sx

L'ANOVA ad un criterio effettuata sfruttando le deviazioni standard relative dei tre blocchi risulta essere quasi sempre sotto il livello di significatività prefissato del 5% per quanto concerne la flessione-estensione della caviglia.

I grafici relativi alle medie e deviazioni standard risultano essere pressoché analoghi per la parte destra e sinistra, e confermano un andamento molto simile tra le camminate in tutti e 3 i gruppi di soggetti.

4 anni

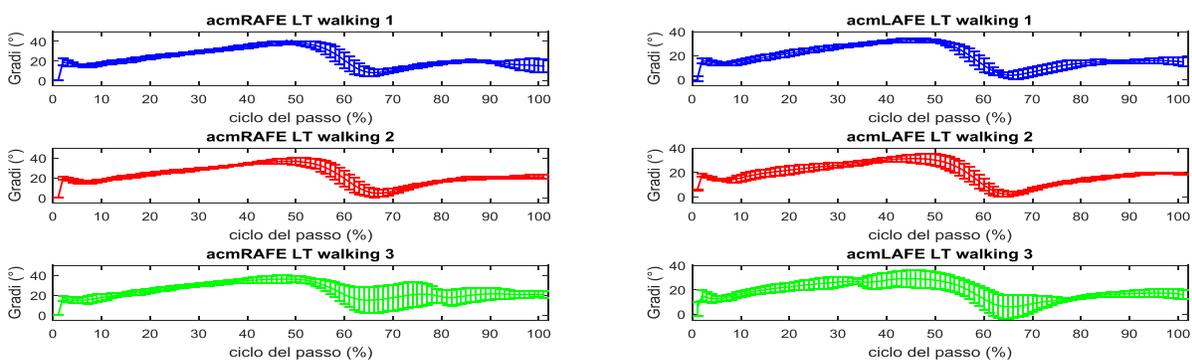


Figura 69 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di flesso-estensione della caviglia (dx e sx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 4 anni

6 anni

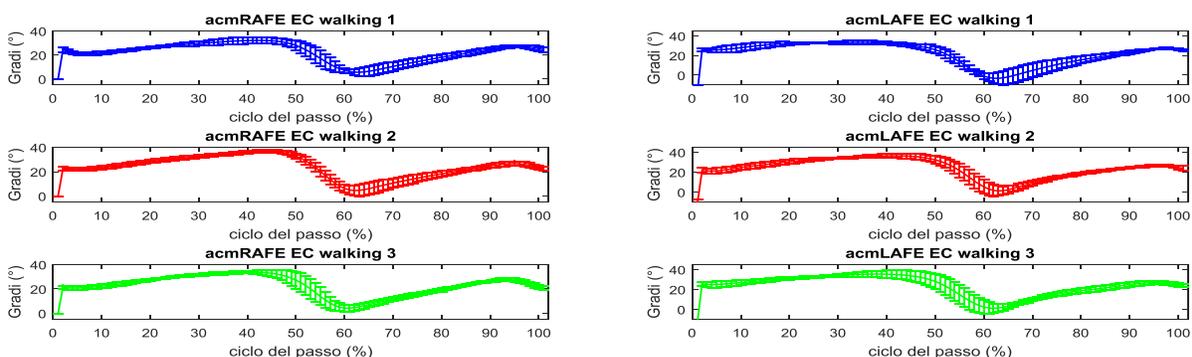


Figura 70 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di flesso-estensione della caviglia (dx e sx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 6 anni

Adulti

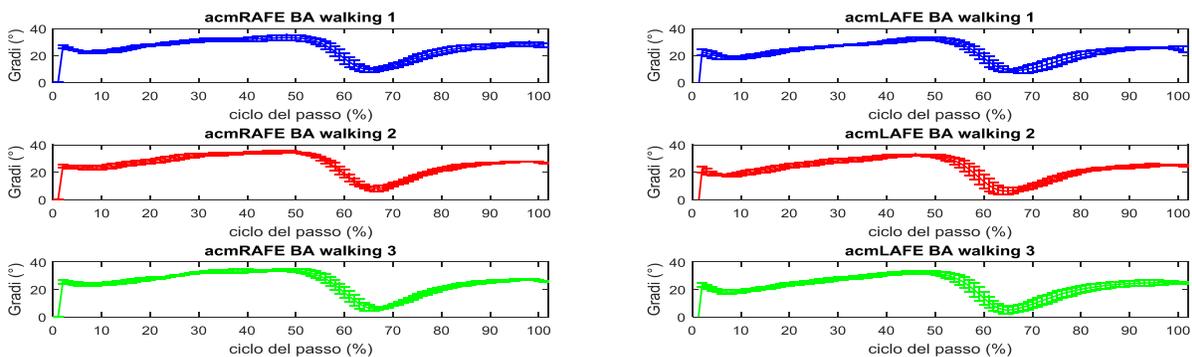


Figura 71 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di flesso-estensione della caviglia (dx e sx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto adulto

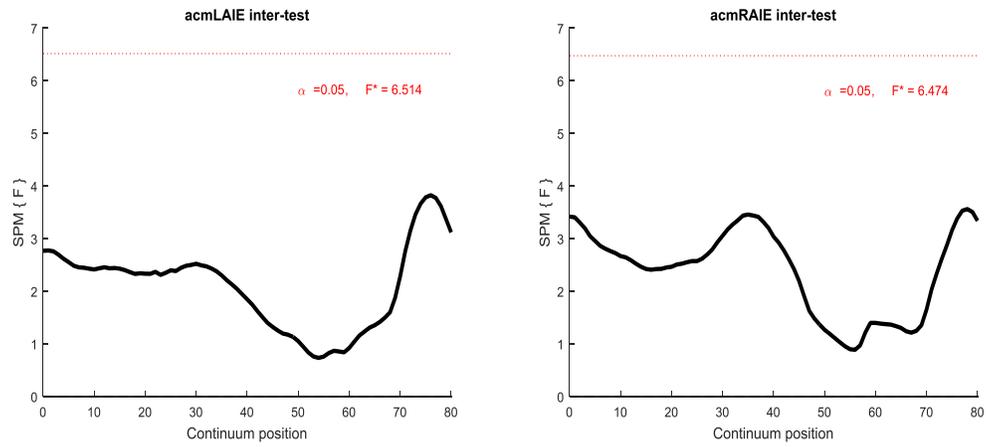


Figura 72 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-test dell'angolo di intra-extra rotazione della caviglia, dx e sx

La statistica sulla intra-extra rotazione della caviglia non mostra variabilità significativa.

GINOCCHIO

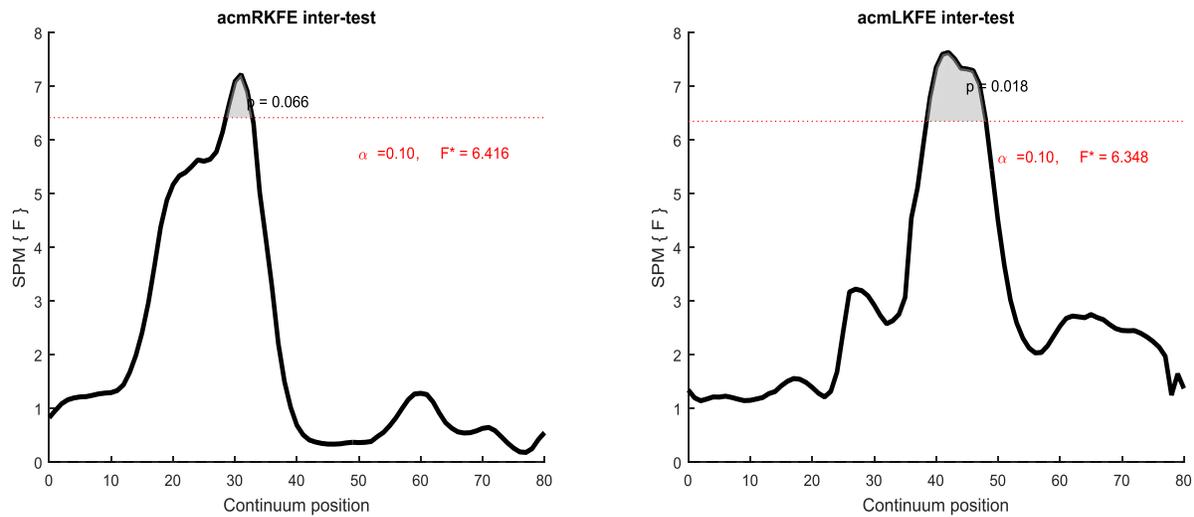


Figura 73 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-test dell'angolo di flessione-estensione del ginocchio, dx e sx

L'analisi statistica dell'angolo di flessione-estensione del ginocchio ha mostrato un effetto dell'età sulla variabilità inter-test in un picco ben definito, sia per quanto riguarda il ginocchio destro che per il sinistro. La restante parte di curva non mostra differenze significative.

4 anni

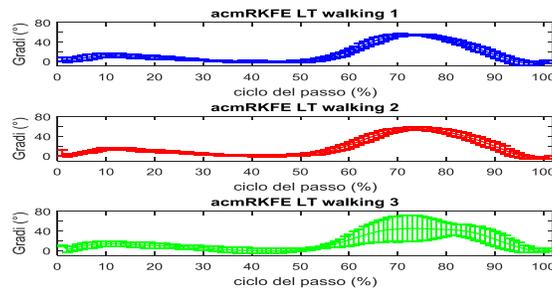


Figura 74 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di flessione-estensione del ginocchio (dx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 4 anni

6 anni

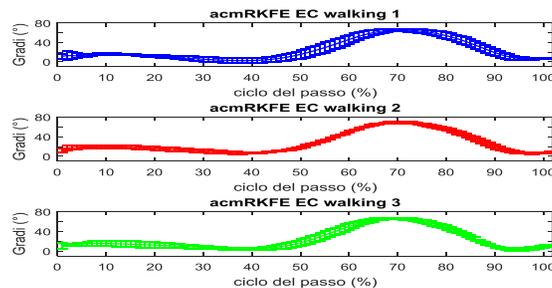


Figura 75 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di flessione-estensione del ginocchio (dx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 6 anni

Adulti

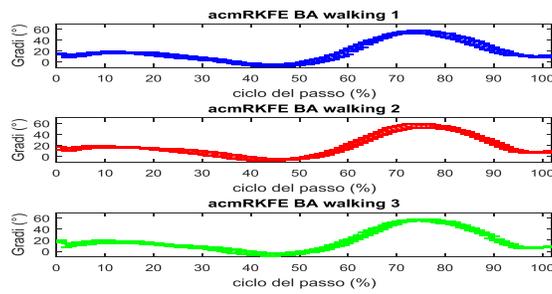


Figura 76 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di flessione-estensione del ginocchio (dx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto adulto

La statistica di abd-adduzione ed intra-extra rotazione del ginocchio non mostra un effetto dell'età sulla variabilità inter-test.

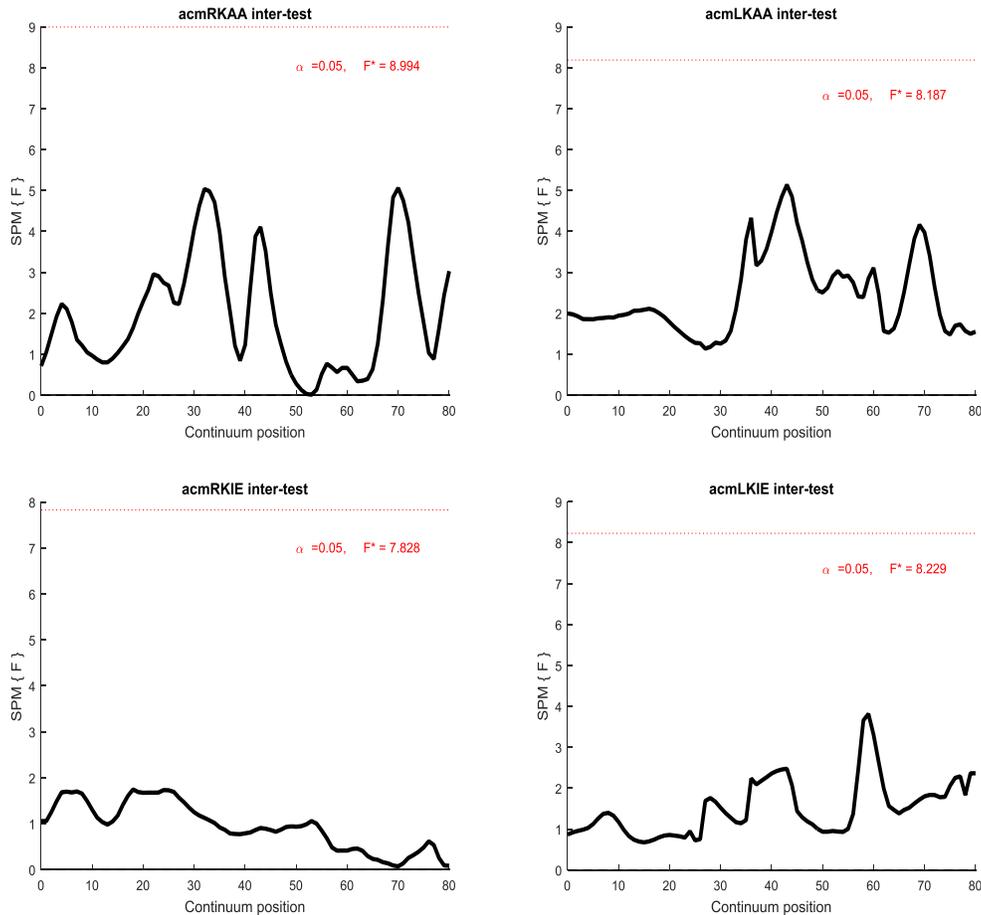


Figura 77 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-test degli angoli di abd-adduzione e intra-extra rotazione del ginocchio, dx e sx

ANCA

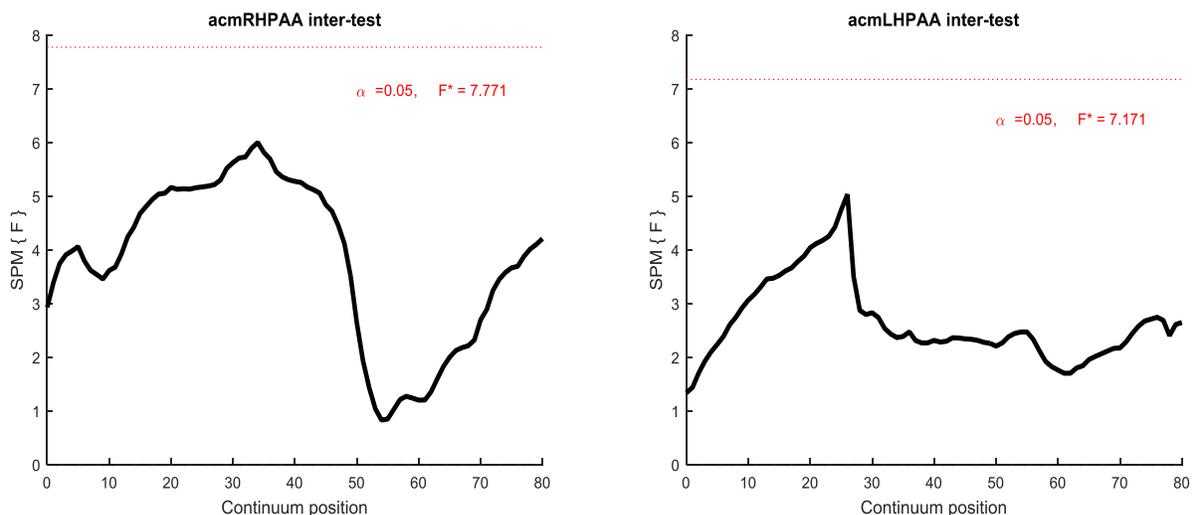


Figura 78 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-test dell'angolo di abd-adduzione dell'anca, dx e sx

L'angolo articolare dell'anca dovuto al movimento di abd-adduzione risulta avere una ripetibilità inter-test simile nei tre gruppi. L'ANOVA mostra valori stabilmente sotto il livello di significatività.

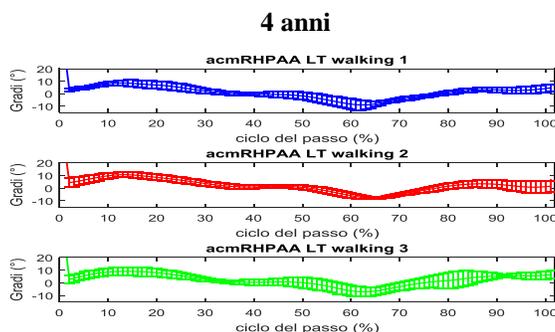


Figura 79 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di abd-adduzione dell'anca (dx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 4 anni

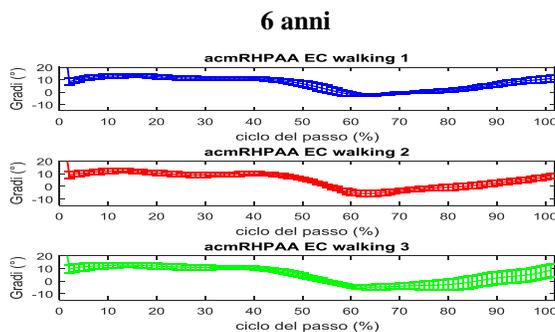


Figura 80 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di abd-adduzione dell'anca (dx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 6 anni

Adulti

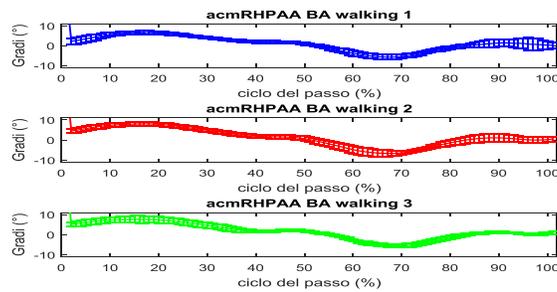


Figura 81 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di abd-adduzione dell'anca (dx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto adulto

La statistica di flessione-estensione ed intra-extra rotazione non mostra effetti significativi dell'età sulla variabilità inter-test di questi angoli.

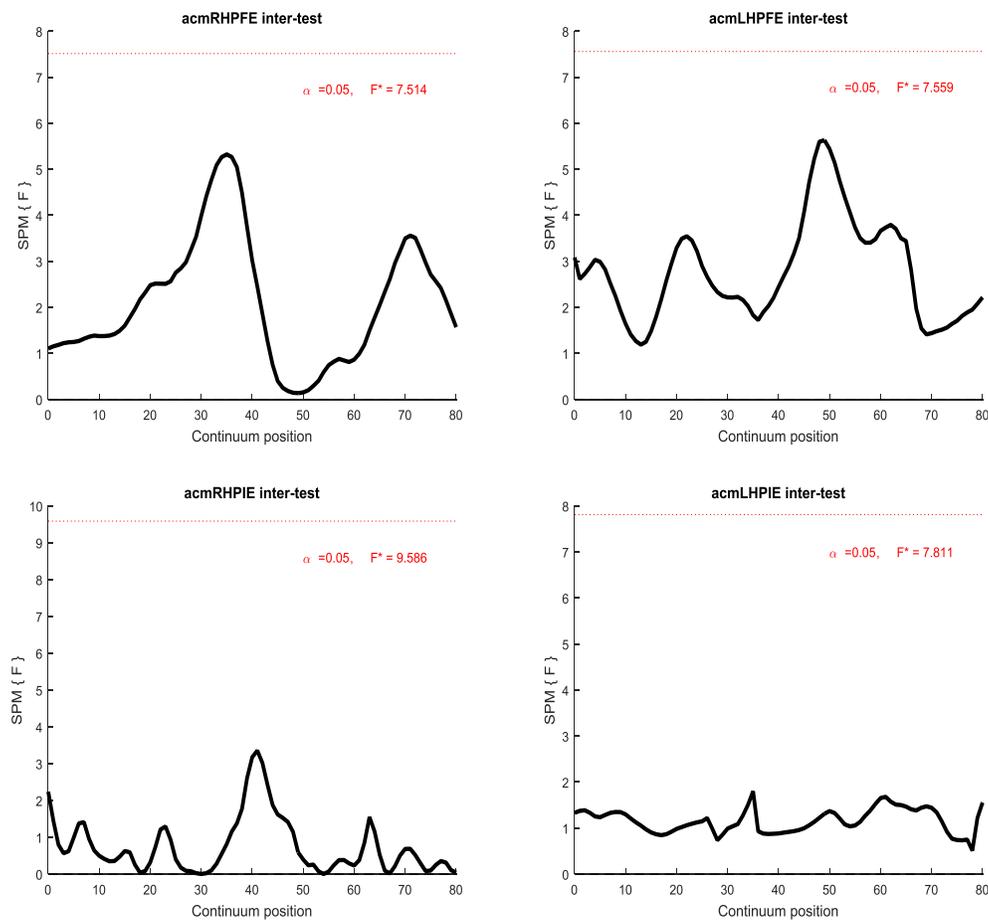


Figura 82 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-test degli angoli di flessione-estensione e intra-extra rotazione dell'anca, dx e sx

PELVI

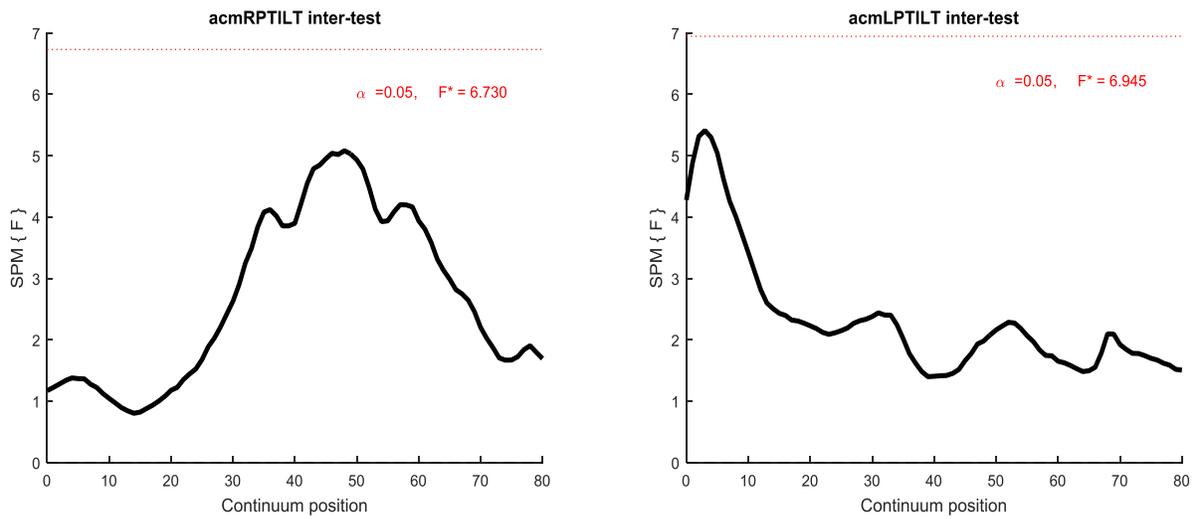


Figura 83 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-test dell'angolo di tilt pelvico, dx e sx

L'ANOVA applicata sulla variabilità inter-test dell'angolo articolare di tilt pelvico non mostra effetto significativo dell'età.

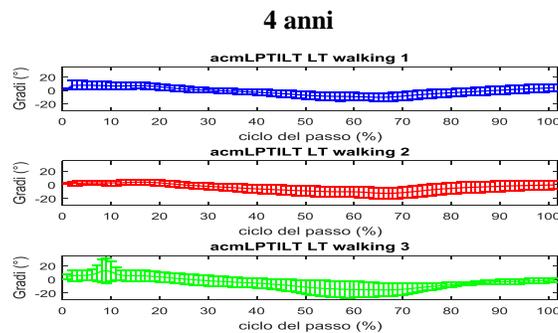


Figura 84 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di tilt pelvico (sx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 4 anni

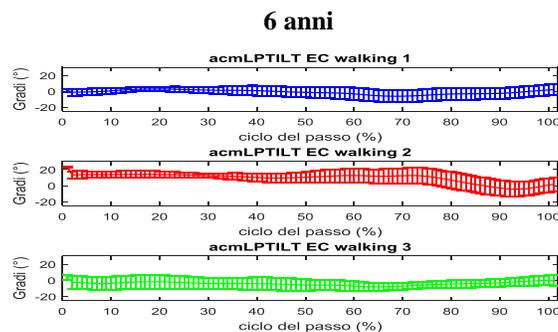


Figura 85 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di tilt pelvico (sx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto di 6 anni

Adulti

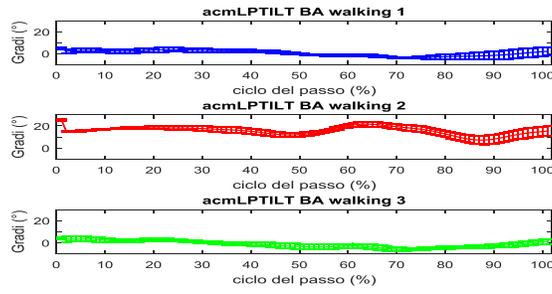


Figura 86 - Media \pm deviazione standard dell'angolo di tilt pelvico (sx) durante un ciclo del passo nelle tre prove per un soggetto adulto

L'ANOVA non mostra effetto dell'età sull'obliquità della pelvi, mentre si può notare una diminuzione statisticamente significativa con l'aumentare dell'età sulla rotazione pelvica.

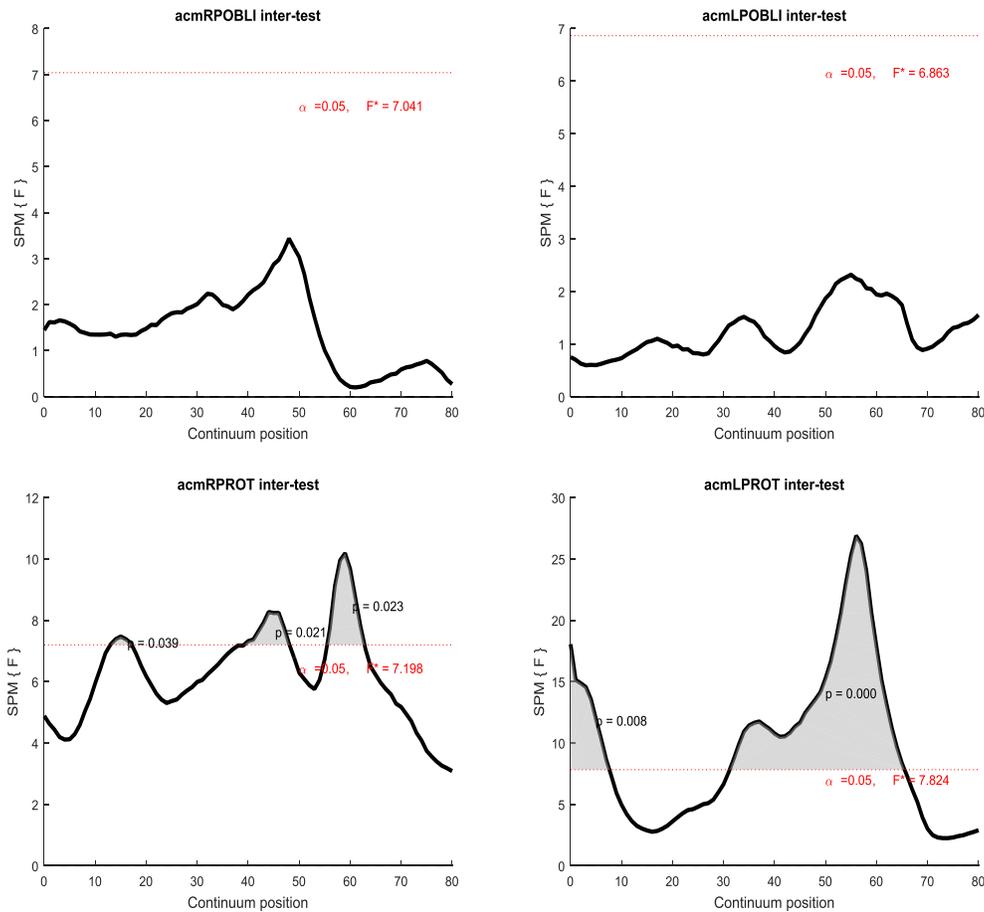


Figura 87 - Risultati del test ANOVA applicato alla variabilità intra-test degli angoli di obliquità e rotazione pelvica, dx e sx

Capitolo 4: Discussione

Nel presente studio è stata valutata l'ipotesi che la traiettoria del Centro di Massa (CoM) sia un parametro caratterizzante la maturazione del cammino durante la crescita. Dalla letteratura emerge che data l'alta variabilità segmentale dei bambini, è difficile utilizzare l'analisi del movimento dei singoli angoli articolari per monitorare la maturazione del cammino. A questo scopo sono state confrontate la variabilità del centro di massa e dei segmenti corporei in soggetti normodotati, di fasce di età differenti, per valutare le differenze statistiche tra variabilità cinematica del CoM e cinematica segmentale (angoli articolari): bambini di 4, bambini di 6 anni e giovani adulti. Mediante il sistema di stereofotogrammetria e marker riflettenti (protocollo Plug-in gait) è stata analizzata la cinematica del cammino dei soggetti coinvolti nello studio durante camminate consecutive e intervallate da pause. Sono stati utilizzati software per l'acquisizione, l'elaborazione e l'analisi dei parametri cinematici. La variabilità dei dati è stata analizzata secondo tre differenti modalità (Inter-subject in intra-test, Intra-subject in intra-test, Inter-test in intra-subject).

È stato osservato un trend simile in termini di variabilità del centro di massa tra i bambini e gli adulti in tutte e tre le modalità di analisi sopra citate. In particolar modo, la variabilità sull'asse anteroposteriore è risultata quasi identica, mentre sull'asse medio-laterale i bambini presentano ancora variabilità maggiore rispetto agli adulti.

Sulla variabilità degli angoli articolari è stato invece evidenziato un effetto significativo dell'età, in maniera più marcata nelle modalità di Inter-subject ed Intra-subject e in maniera meno accentuata nell'Inter-test. Per quanto concerne l'Inter-subject, le differenze di variabilità maggiori sono state osservate nei segmenti distali del corpo, come la caviglia ed il ginocchio, dove i bambini hanno ancora un trend molto diverso sia tra di loro che se confrontati con gli adulti. L'analisi della varianza in Intra-subject ha invece evidenziato un effetto significativo dell'età sugli angoli articolari di anca e pelvi, ed in maniera meno marcata sugli angoli di flesso-estensione del ginocchio ed intra-extra rotazione della caviglia. In Inter-test si è vista una ripetibilità maggiore sui segmenti di anca e caviglie, mentre gli unici angoli articolari statisticamente diversi sono stati l'angolo di rotazione pelvica e quello di flesso-estensione del ginocchio.

L'analisi statistica ha quindi dimostrato come la variabilità degli angoli articolari sia maggiore nei bambini rispetto agli adulti, mentre riguardo alla traiettoria del centro di massa i risultati sono confrontabili. A 6 anni i bambini presentano un pattern cinematico simile a quello degli adulti, ma a 4

anni la variabilità segmentale è ancora molto maggiore di quella dei soggetti maturi, mentre la variabilità del centro di massa risulta pressoché simile tra i tre gruppi. Questo ci porta a supporre che il centro di massa possa essere un parametro descrittivo dello sviluppo motorio, in maniera maggiore rispetto alla cinematica segmentale.

Il controllo motorio sembra comunque essere focalizzato sulla progressione del centro di massa, e non sulla stabilizzazione laterale: la variabilità della traiettoria del CoM sull'asse medio-laterale nei bambini è risultata essere maggiore di quella degli adulti, mentre sul piano sagittale (asse anteroposteriore) la ripetibilità dei bambini e degli adulti è risultata molto simile.

4.1 Conclusioni e sviluppi futuri

L'ipotesi del presente elaborato è stata confermata dall'analisi delle traiettorie del centro di massa e degli angoli articolari. Dalla letteratura è emerso che i bambini nell'età compresa tra i 4 ed i 6 anni hanno raggiunto una relativa maturazione del cammino, ma la loro variabilità cinematica appare maggiore rispetto a quella degli adulti. Dai risultati di questo studio, la variabilità della traiettoria del centro di massa nei bambini analizzati risulta essere vicina a quella dei soggetti maturi.

È comunque necessario specificare che lo studio è stato condotto su 7 soggetti per gruppo, per cui l'analisi su un più ampio campione di soggetti permetterà di validare ulteriormente questi risultati. Per l'analisi sulla variabilità Inter-subject sarà necessario valutare l'eventuale rilevanza della normalizzazione dei dati, ad esempio rispetto all'altezza dei soggetti. Inoltre sarà interessante valutare la forma della traiettoria del centro di massa dei tre gruppi per vedere se e quanto, oltre ad essere ripetibile, la traiettoria del CoM nei bambini si avvicina a quella del pendolo inverso degli adulti. Inoltre studi su bambini di età inferiore a quella considerata nel presente lavoro (magari con sensori inerziali, più semplici e facili da utilizzare con i bambini) potrebbero validare l'ipotesi della traiettoria del centro di massa come fattore guida dello sviluppo motorio.

Riferimenti bibliografici

- Beck, R. J., Andriacchi, T. P., Kuo, K. N., Fermier, R. W., & Galante, J. O. (1981). Changes in the gait patterns of growing children. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 63(9), 1452-1457.
- Bernstein, N. A. (1967). The co-ordination and regulation of movements.
- Bisi, M. C., & Stagni, R. (2015). Evaluation of toddler different strategies during the first six-months of independent walking: A longitudinal study. *Gait & posture*, 41(2), 574-579.
- Bosch, K., Gerss, J., & Rosenbaum, D. (2007). Preliminary normative values for foot loading parameters of the developing child. *Gait & posture*, 26(2), 238-247.
- Brenière, Y., & Bril, B. (1988). Why do children walk when falling down while adults fall down in walking?. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série III, Sciences de la vie*, 307(11), 617.
- Breniere, Y., & Bril, B. (1998). Development of postural control of gravity forces in children during the first 5 years of walking. *Experimental Brain Research*, 121(3), 255-262.
- Cappozzo, A. (1981). Analysis of the linear displacement of the head and trunk during walking at different speeds. *Journal of Biomechanics*, 14(6), 411-425.
- DeLuca, P. A., Davis III, R. B., Öunpuu, S., Rose, S., & Sirkin, R. (1997). Alterations in surgical decision making in patients with cerebral palsy based on three-dimensional gait analysis. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 17(5), 608-614.
- Dempster, W. T., & Gaughran, G. R. (1967). Properties of body segments based on size and weight. *American Journal of Anatomy*, 120(1), 33-54.
- Dominici, N., Ivanenko, Y. P., Cappellini, G., d'Avella, A., Mondì, V., Cicchese, M., ... & Lacquaniti, F. (2011). Locomotor primitives in newborn babies and their development. *Science*, 334(6058), 997-999.
- Grieve, D. W., & Gear, R. J. (1966). The relationships between length of stride, step frequency, time of swing and speed of walking for children and adults. *Ergonomics*, 9(5), 379-399.
- Hazlewood, M. E., Hillman, S. J., Lawson, A. M., & Robb, J. E. (1997). Marker attachment in gait analysis: on skin or lycra?. *Gait & Posture*, 6(3), 265.
- Jensen, R. K. (1986). Body segment mass, radius and radius of gyration proportions of children. *Journal of biomechanics*, 19(5), 359-368.

- Menkveld, S. R., Knipstein, E. A., & Quinn, J. R. (1988). Analysis of gait patterns in normal school-aged children. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 8(3), 263-267.
- Müller, J., Müller, S., Baur, H., & Mayer, F. (2013). Intra-individual gait speed variability in healthy children aged 1–15 years. *Gait & posture*, 38(4), 631-636.
- Papi, E., Rowe, P. J., & Pomeroy, V. M. (2015). Analysis of gait within the uncontrolled manifold hypothesis: Stabilisation of the centre of mass during gait. *Journal of biomechanics*, 48(2), 324-331.
- Perry, J., & Davids, J. R. (1992). Gait analysis: normal and pathological function. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 12(6), 815.
- Riva, F. e Stagni, R. (2013). *Appunti del corso di Biomeccanica*.
- Scholz, J. P., & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental brain research*, 126(3), 289-306.
- Stansfield, B. W., Hillman, S. J., Hazlewood, M. E., Lawson, A. A., Mann, A. M., Loudon, I. R., & Robb, J. E. (2001). Normalized speed, not age, characterizes ground reaction force patterns in 5-to 12-year-old children walking at self-selected speeds. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 21(3), 395-402.
- Stern, K. A., & Gottschall, J. S. (2012). Child temporal-spatial gait characteristics and variability during uphill and downhill walking. *Pediatric Physical Therapy*, 24(3), 285-290.
- Sutherland, D. H., & Olshen, R. (1988). *The development of mature walking*. Cambridge University Press.
- Sutherland, D. (1997). The development of mature gait. *Gait & Posture*, 6(2), 163-170.
- Todd, F. N., Lamoreux, L. W., Skinner, S. R., Johanson, M. E., St Helen, R., Moran, S. A., & Ashley, R. K. (1989). Variations in the gait of normal children. A graph applicable to the documentation of abnormalities. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 71(2), 196-204.
- van der Linden, M. L., Kerr, A. M., Hazlewood, M. E., Hillman, S. J., & Robb, J. E. (2002). Kinematic and kinetic gait characteristics of normal children walking at a range of clinically relevant speeds. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 22(6), 800-806.
- Van Hamme, A., El Habachi, A., Samson, W., Dumas, R., Chèze, L., & Dohin, B. (2015). Gait parameters database for young children: The influences of age and walking speed. *Clinical Biomechanics*.
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley & Sons.

