

## Capitolo 3

### La meccanica del movimento umano

Il movimento umano è un evento fisico tridimensionale governato dalla legge di Newton; nondimeno risulta essere un fenomeno estremamente complesso da descrivere. Alla corretta esecuzione di qualsivoglia compito motorio concorrono così numerose variabili e vincoli di natura fisiologica e meccanica da far sì che una descrizione dettagliata del processo sia pressoché impossibile. Lungi dal voler competere in un campo così vasto e complicato si fa strada la necessità di scegliere, a priori, quali siano quelle sfaccettature dell'intero fenomeno che si vuole mettere in luce, e dalle quali si vuole giungere a risultati ragionevolmente verosimili ancorché approssimati.

Le modalità semplificative adottate in letteratura sono numerose, partendo da semplici modellazioni, preludio ad approcci più profondi, fino ad arrivare a descrizioni notevolmente articolate negli aspetti fisiologici, (neuro)locomotori e meccanici.

In questa tesi le semplificazioni di modello sono dominanti così come il numero e la natura dei task motori dei quali si cerca di definire la dinamica.

All'interno della vasta casistica allo studio si è scelto, in collaborazione con il Laboratorio di Analisi del Movimento degli Istituti Ortopedici Rizzoli, di fare oggetto di analisi due compiti di moto che, dal punto di vista meccanico, sembrano presentare natura e strategia di esecuzione simili: l'atto di alzata da una sedia (sit-to-stand) e l'atto di salita di un gradino.

Il fine ultimo, in entrambi i casi, è stato quello di cercare di valutare l'entità e la forma delle coppie e delle forze che vengono esplicitate alle articolazioni con particolare riguardo nei confronti dell'articolazione del ginocchio.

Il problema della determinazione delle forze articolari è ben noto in analisi del movimento e nella maggioranza dei lavori è affrontato con tecniche di dinamica inversa. Da tali lavori si vede come l'errore di modello induce incoerenze nei risultati ottenuti e come non sia facile eliminarle senza incorrere in eccessive complicazioni del modello stesso.

Tuttavia questo modo di procedere segue il percorso opposto a ciò che realmente accade. La reale successione degli eventi inizia con una sollecitazione nervosa a carico dei muscoli i quali contraendosi determinano il movimento relativo dei segmenti ossei che si traduce, nel suo complesso, nel movimento del corpo rispetto all'ambiente circostante. In ciò consiste il problema diretto.

Si porterà a soluzione il problema inverso della determinazione delle coppie articolari attraverso l'uso della soluzione diretta del moto.

### ***3.1 Ipotesi e vincoli per un modello diretto***

In accordo con quanto riportato in letteratura occorre mettere in chiaro quali debbano essere i presupposti che, concettualmente prima che quantitativamente, validino un modello diretto del corpo umano nel suo aspetto locomotorio.

I principali assunti, raccolti da D. Winter, sono :

1. Accurata scelta dei dati antropometrici.

2. Non devono esserci vincoli esterni di tipo cinematico: al modello deve essere permesso di cadere, saltare o crollare secondo quanto imposto dalle forze articolari.
3. Le condizioni iniziali devono contenere le velocità e le posizioni di ogni segmento osseo.
4. Le uniche variabili d'ingresso possono essere le forze applicate dall'ambiente esterno e quelle generate dai muscoli.
5. Il modello deve incorporare i principali gradi di libertà del sistema reale.
6. Le forze di interazione (forza di contatto piede-suolo, ecc.) devono essere calcolate.

Certamente i punti precedenti sono di importanza fondamentale per impostare la soluzione del problema dinamico diretto. Tuttavia la loro estrema generalità porta inevitabilmente alla costruzione di modelli estremamente complessi (si pensi al solo calcolo delle forze d'interazione coll'ambiente esterno) benché completi.

Secondo H.Hatze un modello diretto deve godere di due qualità : la verificabilità e la validità. Per verificabilità s'intende la capacità, del modello, di rappresentare bene il corrispondente 'modello concettuale'; per validità s'intende la capacità del modello di predire in maniera corretta il comportamento del sistema reale.

Adottare i criteri di Hatze in una rivalutazione delle assunzioni di Winter equivale ad adattare i 6 punti visti sopra alle necessità particolari del task che si vuole simulare. In questo modo, continuando a mantenere una buona rigorosità dei risultati, è possibile ridurre in maniera significativa, se non altro per una prima serie di simulazioni, lo sforzo di modellazione.

In particolare il punto 5 potrebbe essere modificato in

5. Il modello deve incorporare i principali gradi di libertà che caratterizzano il tipo di task che si vuole simulare.

Nello stesso senso può essere modificato il punto 2.

### 3.2 Modello per analisi del movimento

In letteratura la complessità dei modelli utilizzati per la simulazione è quantomai varia. Si passa da semplici pendoli inversi per valutazioni sul controllo della postura fino a sistemi costituiti da 17 e più corpi rigidi interagenti utilizzati in analisi del cammino o analisi dell'esecuzione di azioni sportive. In figura è riportato lo schema del modello adottato da Hatze (tratto da Berme, Cappozzo – “Biomechanics of Human Movement”; Bertec 1990) per simulazioni del salto in lungo.

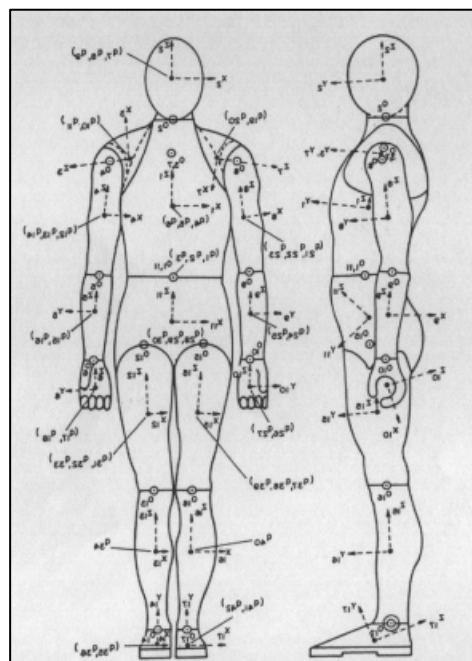


Figura 3.1

In generale, dato il modello, bisogna che esso sia caratterizzato da scelte opportune dei sistemi di riferimento di ciascun segmento e dai relativi parametri dinamici e cinematici (massa, momento d'inerzia, geometria, baricentro). Quest'ultimo passo, pur apparentemente semplice, è in effetti abbastanza problematico. La disponibilità di misure antropometriche esatte è impossibile da realizzare, cosicché occorre affidarsi a tabelle di tipo parametrico (in funzione di misure semplici da ottenere; es.: altezza, peso) non sempre in accordo fra loro sui risultati forniti.

Come vedremo, però, la sensibilità del modello a lievi variazioni dei parametri è ridotta, in modo che i risultati possano essere considerati poco inficiati da questa fonte d'incertezza.

### 3.3 Modelli per sit-to-stand

Il task di sit-to-stand consiste nel sollevamento del corpo da una posizione seduta ad una posizione eretta. Lo svolgimento dell'azione avviene prevalentemente nel piano sagittale in modo che siano minime le accelerazioni normali allo stesso. Quindi, dal punto di vista concettuale, una simulazione di sit-to-stand può essere caratterizzata principalmente da un tipo di moto piano. Inoltre, considerando il corpo simmetrico rispetto al piano di moto, anche il modello può essere considerato piano. Da ultimo i piedi sono considerati solidali al suolo, in modo da rendere possibile la riduzione delle forze di contatto rispetto al giunto della caviglia. Queste ipotesi consentono una drastica riduzione dei componenti che costituiscono il modello in modo che il numero minimo di link sia pari a 3. Una complicazione quasi influente nell'onere computazionale consiste nell'elevare a 4 i corpi in moto relativo. Nel primo caso si adotta la segmentazione di figura 3.2; il secondo è mostrato in figura 3.3.

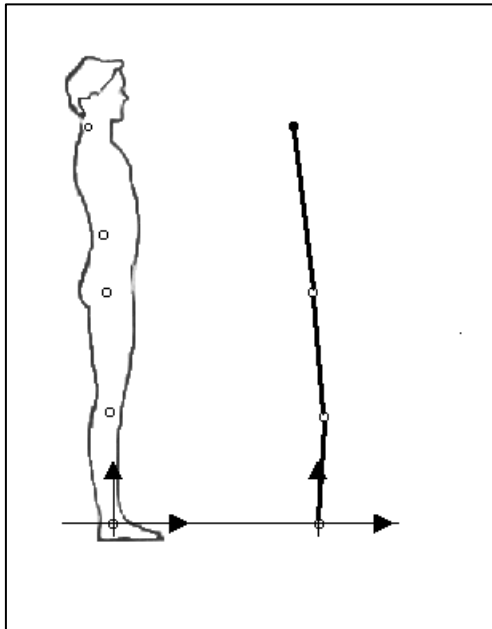


Figura 3.2

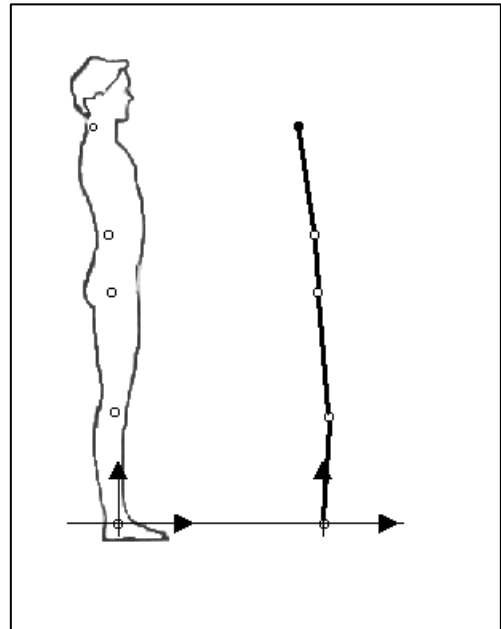


Figura 3.3

### 3.4 Modelli per salita del gradino

Il task di salita di un gradino, diversamente dal precedente, è caratterizzato da spostamenti relativi accentuati, oltreché nel piano sagittale, anche nei restanti piani medio-laterale e frontale. In aggiunta a ciò vi è anche una maggiore complessità nella coordinazione dei moti relativi fra i segmenti corporei.

Tuttavia è possibile immaginare che le strategie adottate per eseguire la salita di un gradino siano simili a quelle adottate nel sit-to-stand. Di seguito analizzeremo tali strategie ponendo in rilievo le similitudini e le differenze fra i due tipi di task e come esse possano modificare i risultati delle simulazioni.

Tipicamente, la salita di un gradino è scomponibile in quattro fasi (fig. 3.4)

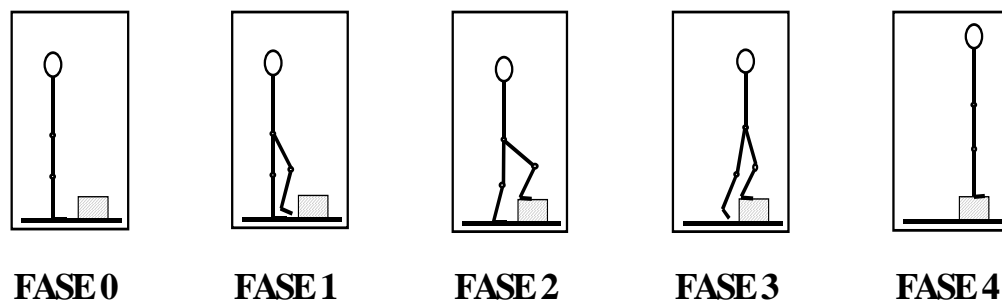


Figura 3.4

Distinte a seconda che l'appoggio si abbia su un unico piede o su entrambi.

La fase di interesse, in questo studio, è la terza, in cui un solo piede è solidale all's.d.r fisso, mentre l'altro si sposta per concludere il compito motorio. Il modello sviluppato è planare e costituito da sette segmenti con una ramificazione all'altezza del link che rappresenta il bacino.

### 3.5 Strategia di controllo per l'esecuzione dei movimenti desiderati

Le tecniche di controllo dei multibodies rinvenibili in letteratura sono fra le più svariate e vanno da applicazioni della teoria del controllo classico fino ad approcci di natura geometrica e analitica fondati sulle proprietà algebriche della struttura di questi sistemi.

Qui si affronta il problema del controllo in maniera elementare ricorrendo ad una tecnica di controllo ottimo detta *inseguimento ottimo LQ* ove l'acronimo LQ sta per lineare e quadratico (vedi Appendice A). Certamente un multibody non è neanche lontanamente un sistema lineare, però la descrizione della dinamica ottenuta utilizzando le equazioni NE, al contrario di formulazioni di tipo lagrangiano, permette di mantenere una corrispondenza molto evidente fra i fenomeni fisici che fondano il moto e le equazioni che ne danno una descrizione quantitativa.

L'idea sulla quale si fondano i risultati ottenuti prende spunto da una osservazione molto semplice che si può fare sul compito di sit-to-stand. Un task di alzata da una posizione seduta potrebbe essere considerato come il compito di *'spostare il tronco da una posizione iniziale ad una finale'*. Nel caso dei modelli adottati occorre sostituire al tronco lo HAT, ma la natura del task resta invariata. Certo, pensare a questa ipotesi come all'unico obiettivo perseguito nell'esecuzione del sit-to-stand non è del tutto corretto, ma ci è sembrato che esso possa essere se non altro considerato di primaria importanza rispetto ad altri.

Considerazioni simili possono essere fatte per la salita del gradino, anche se occorre aggiungere che un obiettivo di importanza non minore dello *'spostamento dello HAT'* è il controllo del piede libero nella fase di singolo appoggio, ovvero quando solo un piede è appoggiato sul gradino. In entrambi i casi lo HAT diventa il corpo rigido, fra tutti i componenti la c.c., che deve essere controllato. La tecnica LQ permette di conoscere quali siano le forze necessarie a muovere un c.r. nello spazio, cosicché il passo conclusivo costituisce la ricerca di quelle coppie ai giunti tali che la c.c. a valle dello HAT gli applichi le forze calcolate. Quest'ultimo calcolo, sviluppato in maniera iterativa lungo i link del multibody (vedi Appendice A), altro non fornisce che l'uguaglianza

$$\tau = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F}_d$$

in cui  $\mathbf{J}(\mathbf{q})$  è la matrice jacobiana della c.c. e  $\mathbf{F}_d$  indica la forza desiderata da applicare allo HAT.

Uno schema di principio della strategia di controllo è riportato in figura 3.4.

In essa è possibile vedere come venga sfruttato l'ulteriore grado di libertà introdotto dalla conoscenza delle forze di reazione al suolo. Esse confrontate con quelle generate dal MB permette di correggere, fuori linea effettuando successive simulazioni, le matrici-peso dell'indice di comportamento nel controllo LQ.

Molto simile è lo schema per la simulazione della salita del gradino, con l'aggiunta, però, di un secondo controllo LQ applicato al piede libero e funzionante in parallelo al primo. In questo caso, per risalire alle coppie ai giunti è necessario calcolare due jacobiani, uno per ciascuna sotto-catena in cui si dirama il multibody (vedi Appendice A).

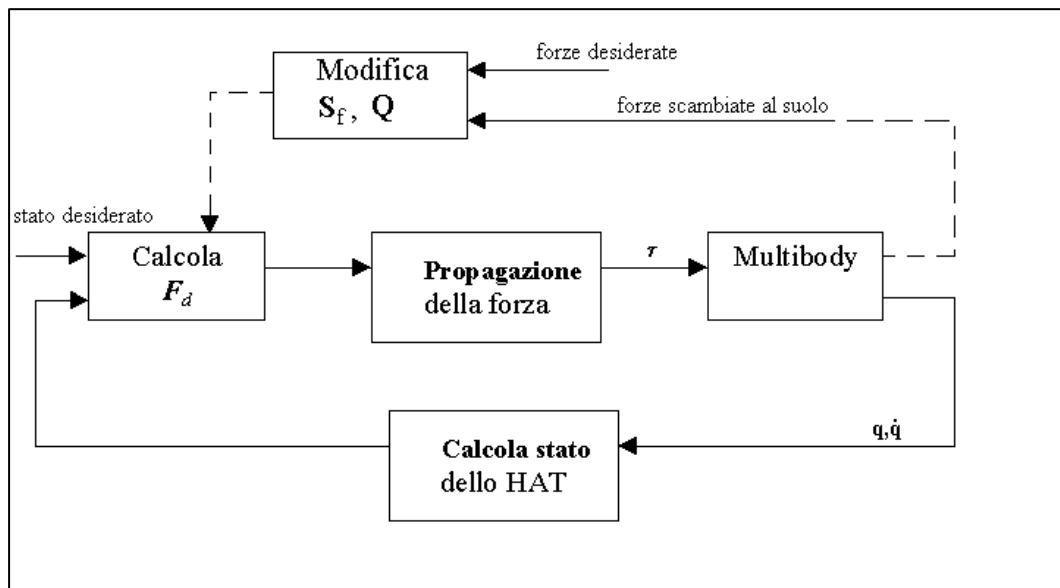


Figura 3.5

**3.6 Risultati delle simulazioni di sit-to-stand**

Il modello usato per la simulazione del sit-to-stand è quello a 3 segmenti. I parametri antropometrici sono stati calcolati dalle tabelle di Winter che consentono di ritenere la parte superiore del corpo (HAT) come un unico c.r. .

I giunti corrispondono perciò alle articolazioni della caviglia, del ginocchio ed alla quinta vertebra lombare (L5).

Le simulazioni sono state eseguite su 3 soggetti anziani e classificate in base alla velocità di esecuzione del compito.

I risultati mostrati nei grafici sono normalizzati in base al peso corporeo ed all'altezza (momenti) ed in base alla durata dell'intervallo di simulazione (tempi di esecuzione).

Simulazione n°1

Esecuzione lenta.

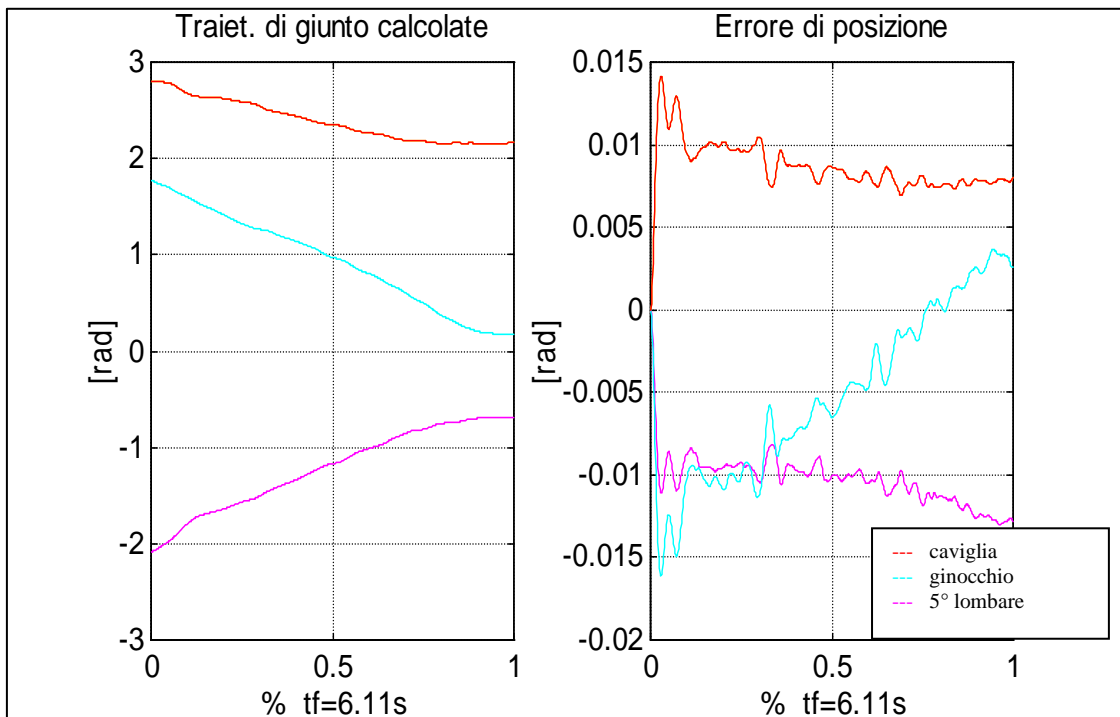


Figura 3.6

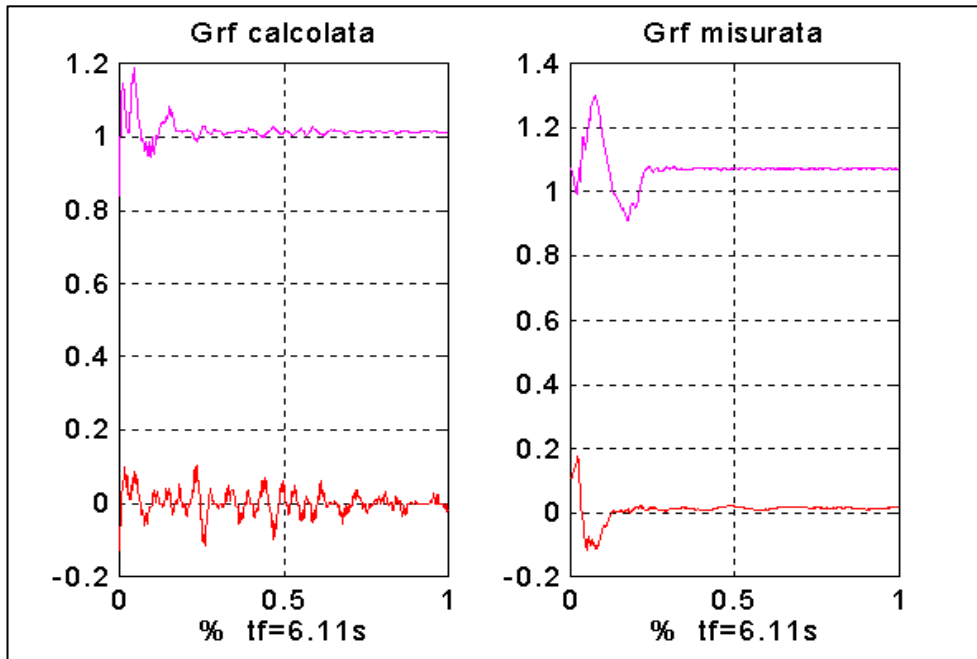


Figura 3.7

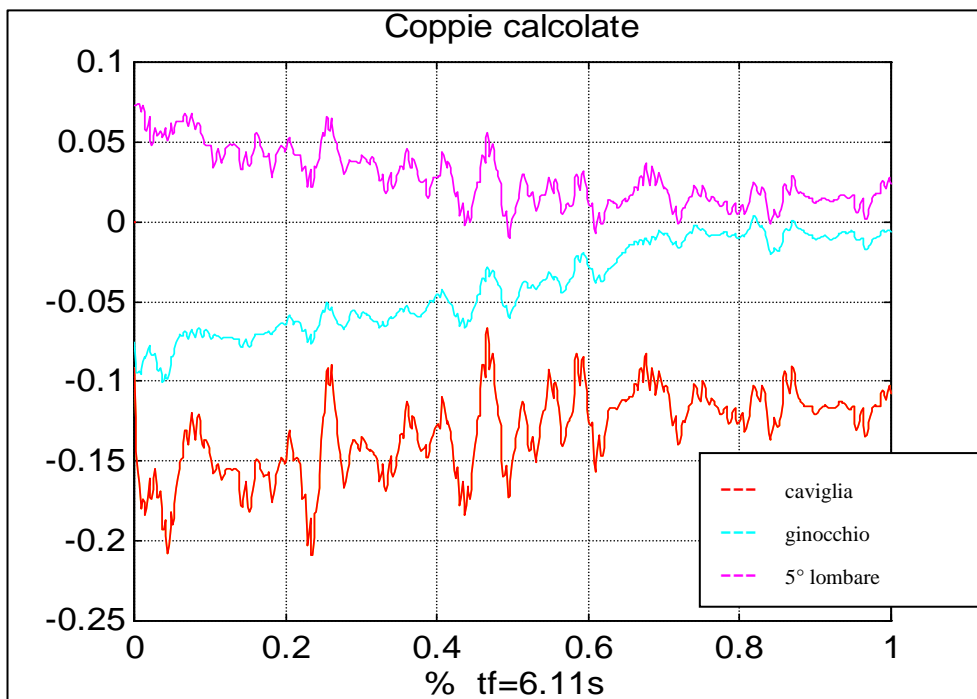


Figura 3.8

Simulazione n°2

Contrariamente ad una simulazione lenta, una simulazione veloce sembra utilizzare le peculiarità della strategia di controllo in maniera migliore. Anche in queste condizioni gli errori di posizione delle traiettorie di giunto sono molto contenuti. Le figure successive mostrano i risultati trovati

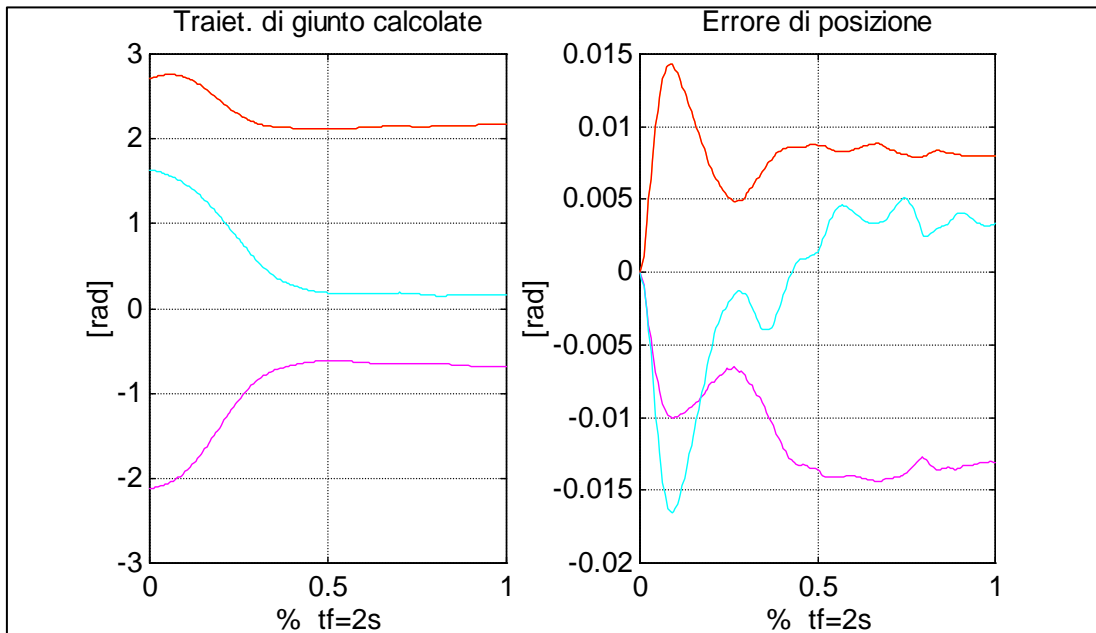


Figura 3.9

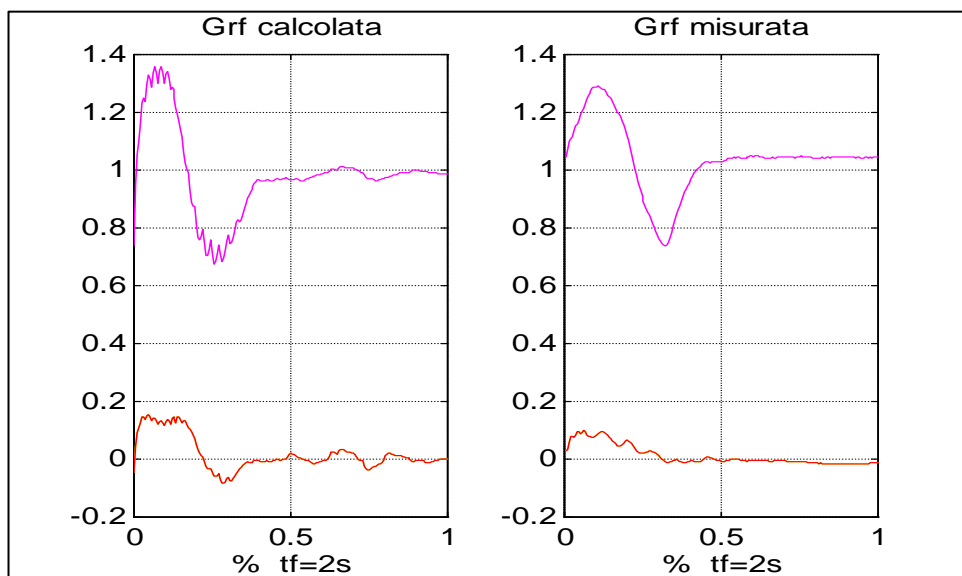


Figura 3.10

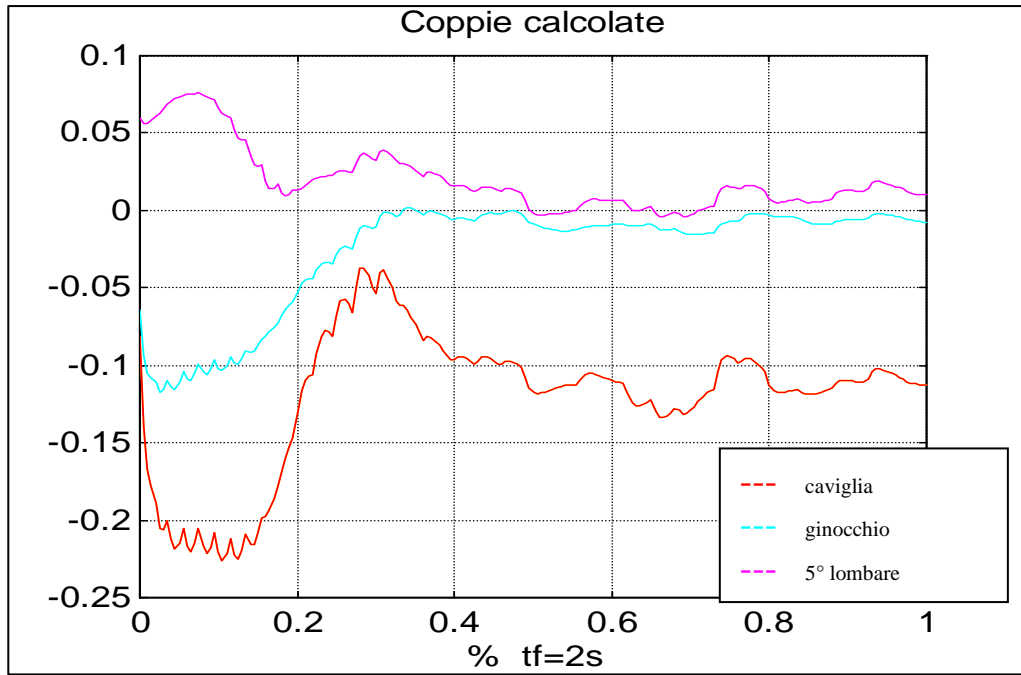
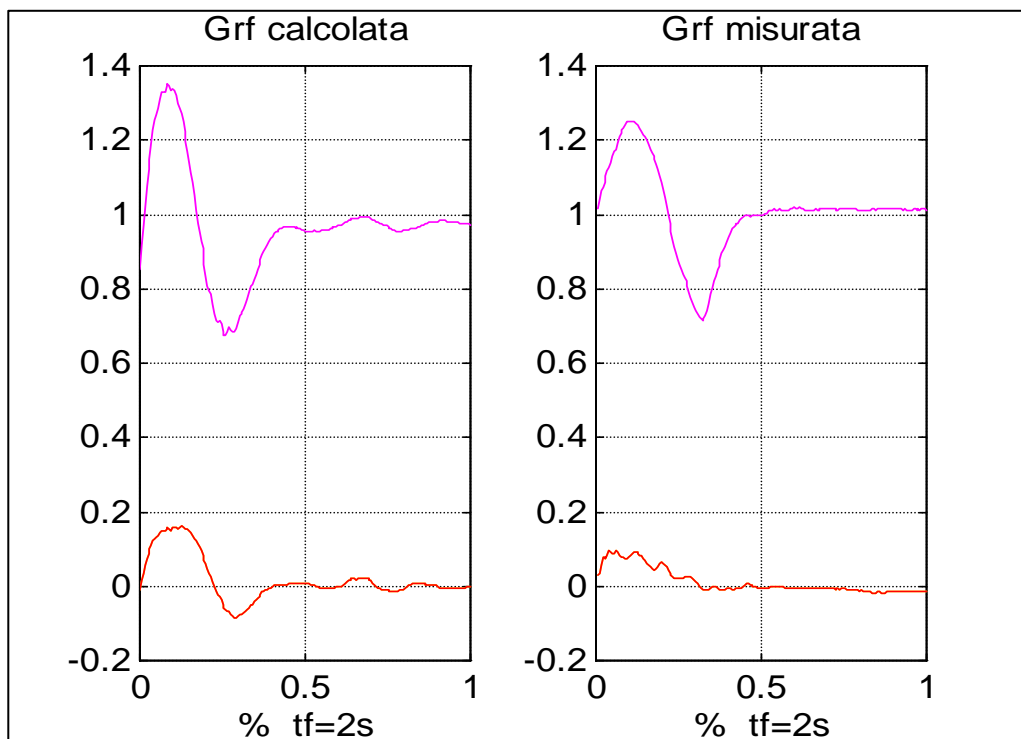


Figura 3.11

Dopo aggiustamenti delle matrici peso nell'equazione di Riccati :



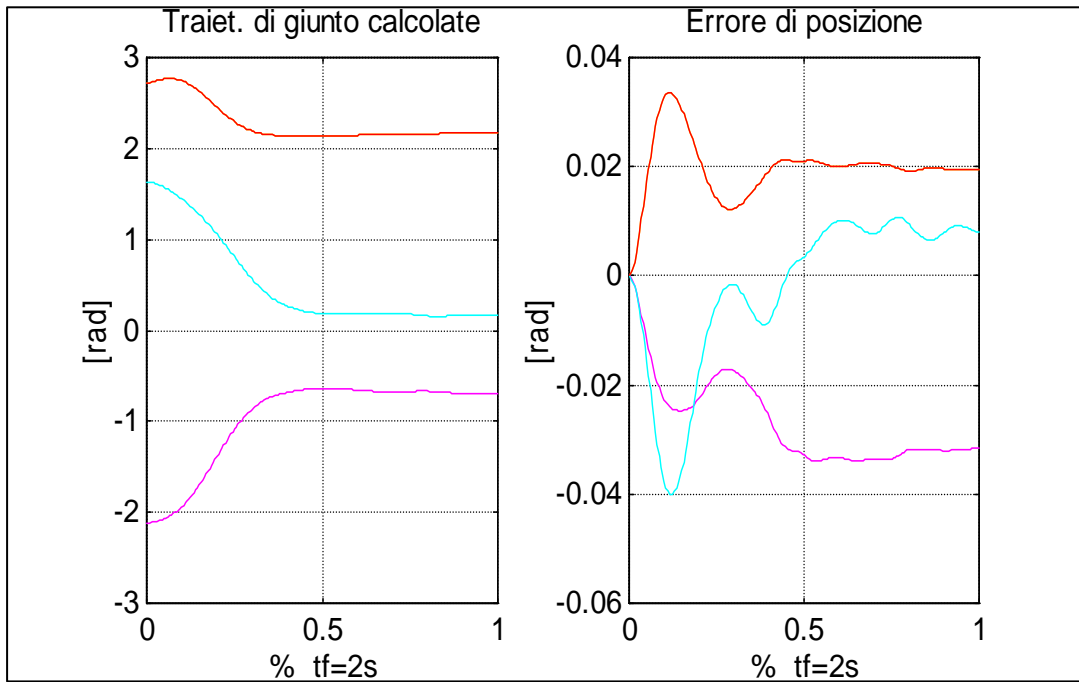


Figura 3.12

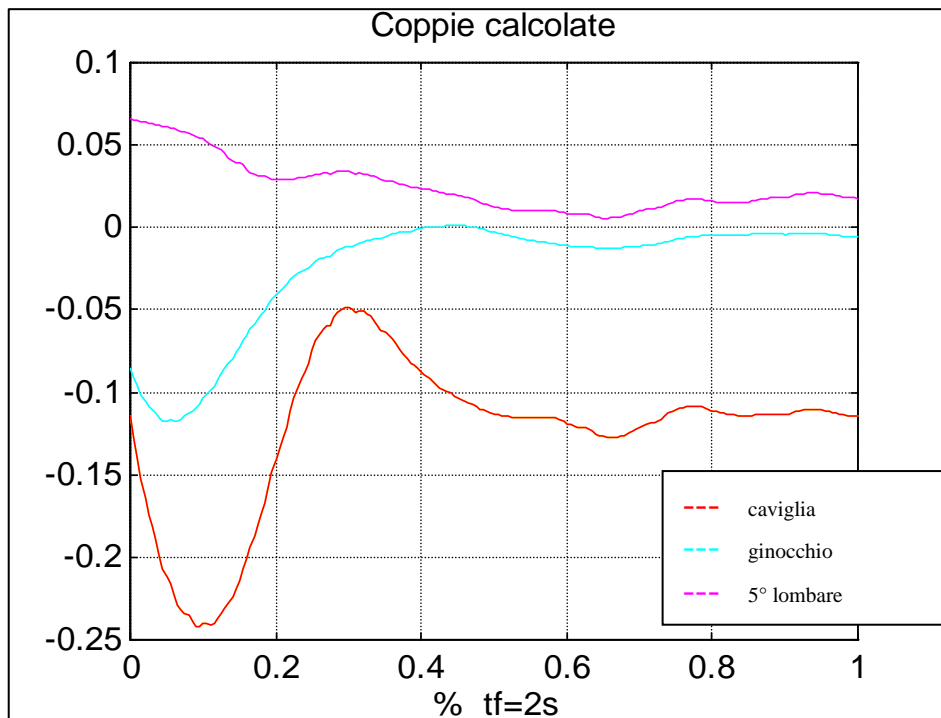


Figura 3.14

Simulazione n°3

Simulazione veloce.

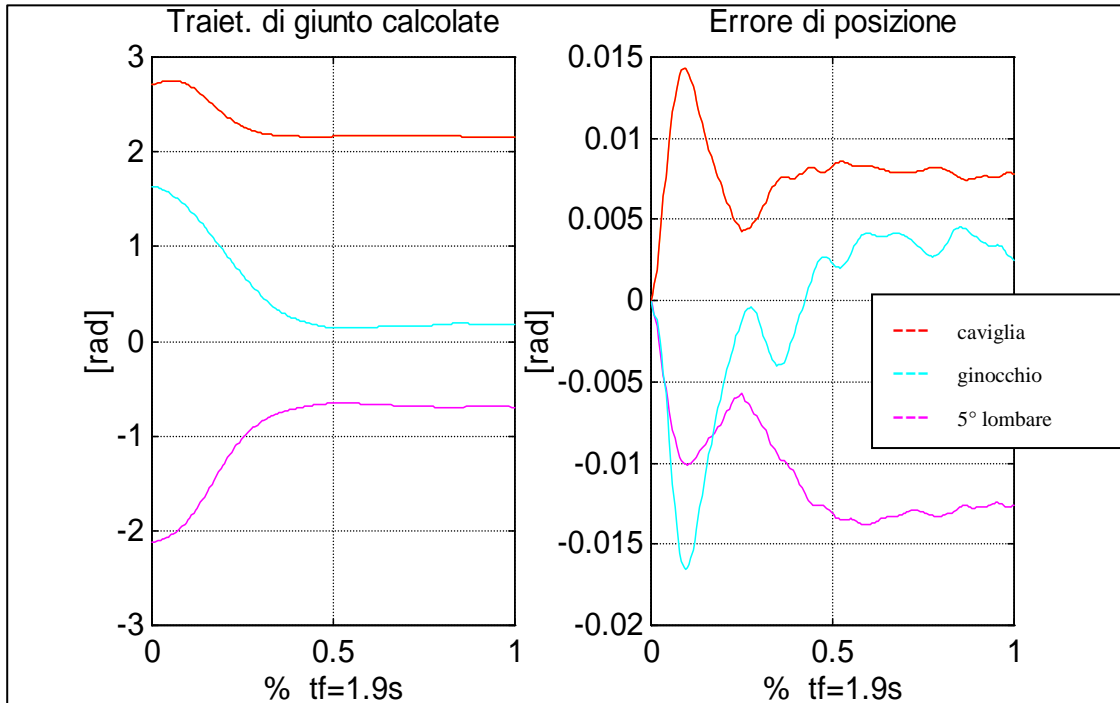


Figura 3.15

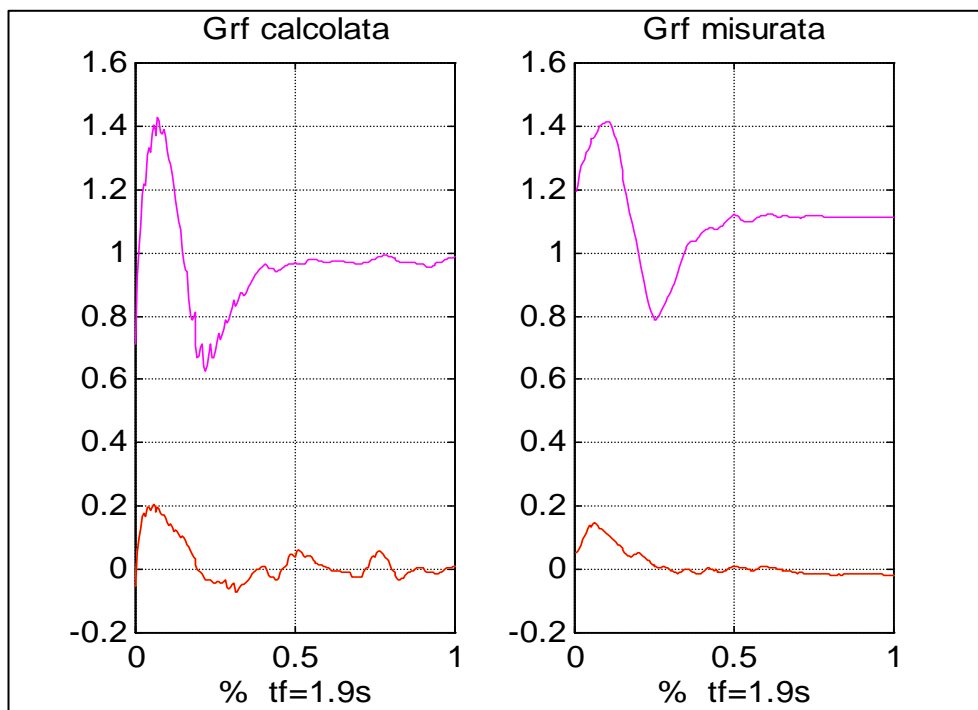


Figura 3.16

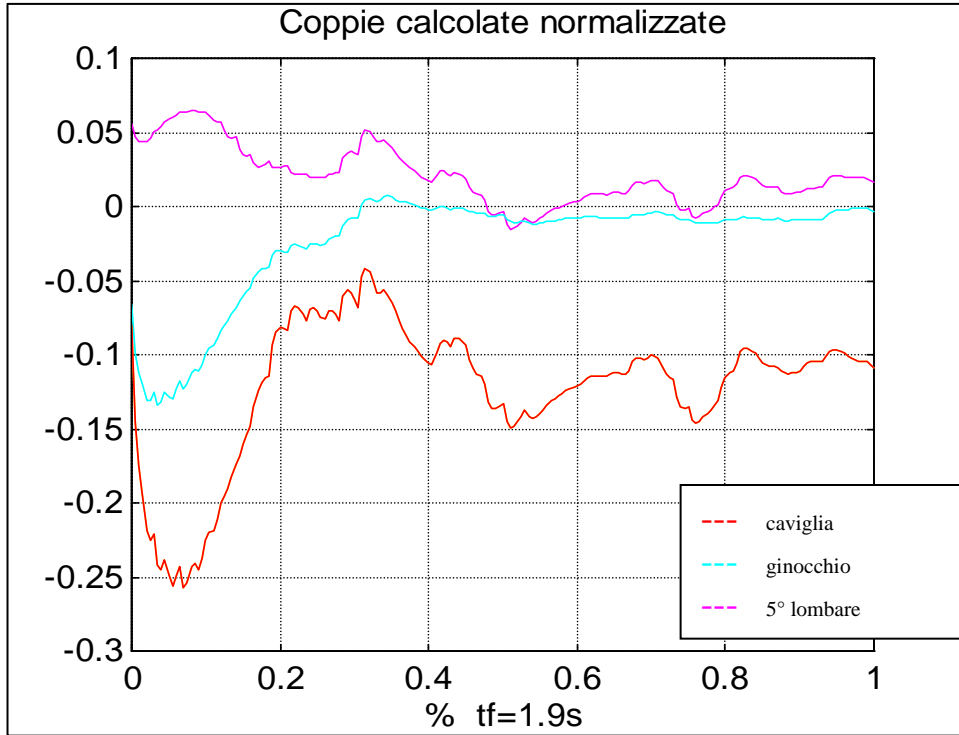


Figura 3.17

E, variando le matrici peso

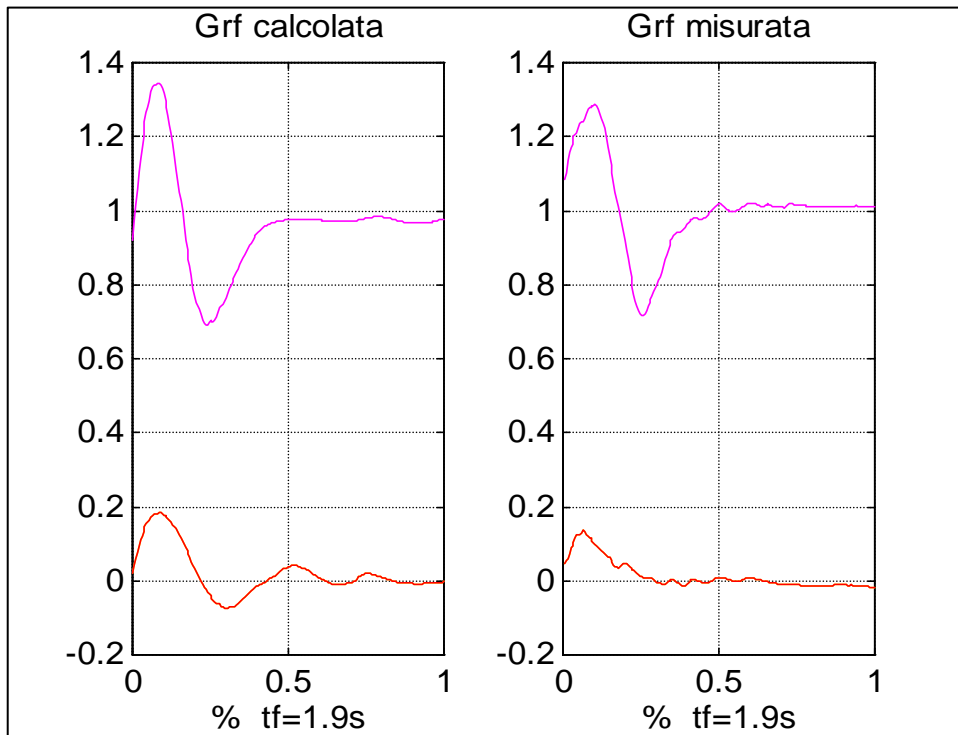


Figura 3.18

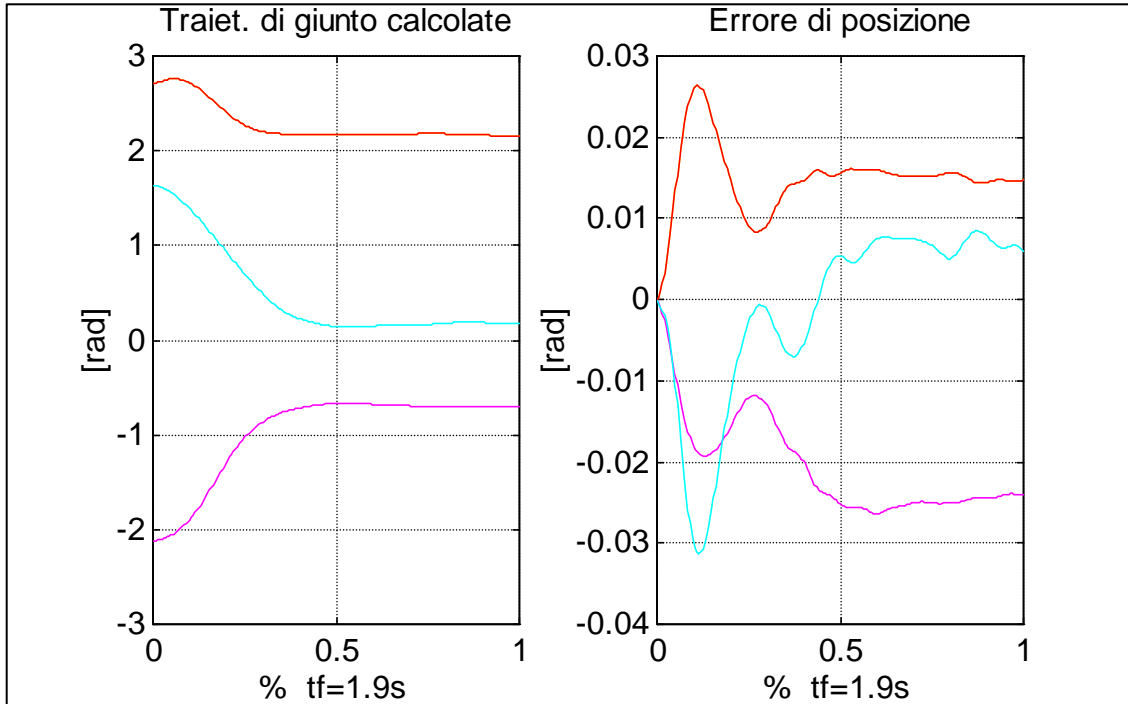


Figura 3.19

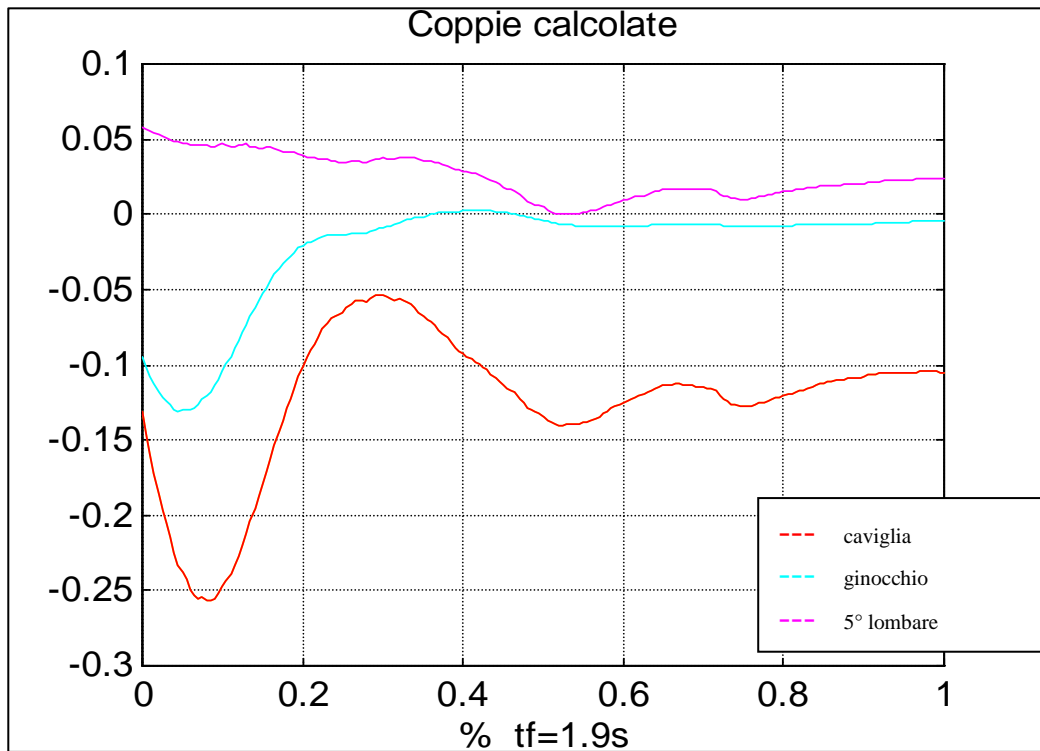


Figura 3.20

Dall'analisi dei grafici sopra riportati è possibile trarre alcune conclusioni sui limiti e le possibilità del modello e del controllo proposto. Quest'ultimo sembra in grado di fornire risultati qualitativamente accettabili solo se l'esecuzione del task di sit-to-stand è eseguita a velocità elevata. In caso contrario non è possibile fornire alcun tipo di validazione ai risultati ottenuti.

L'esecuzione di una alzata a bassa velocità può essere scomposta in due fasi successive: la prima che consiste in uno spostamento del baricentro del corpo in 'avanti' in modo che la sua proiezione sul piano d'appoggio sia contenuta nella superficie d'appoggio dei piedi, la seconda che consta del suo innalzamento rispetto alla posizione iniziale.

Nel caso di una alzata veloce le maggiori accelerazioni impresse ai segmenti corporei fanno in modo che la prima fase abbia durata ed importanza ridotte rispetto alla seconda.

Queste differenze implicano che il comportamento del controllore risulti differente nei due casi: in un'alzata lenta occorrono continue e decise correzioni della traiettoria e della velocità del baricentro dello HAT (esse si riflettono sia nell'andamento delle coppie (fig. 3.8) che in quello delle forze di reazione al suolo (fig. 3.7)). Diversamente, un'alzata veloce, consente un controllo caratterizzato da minori ondulazioni almeno fino a quando il task di sit-to-stand non diventi un task di controllo della postura (dall'istante in cui il soggetto assume la posizione eretta).

Altro problema è la ricerca delle matrici peso più opportune a far sì che ci sia un accordo quantitativo fra le grandezze calcolate e quelle misurate. Modifiche per tentativi successivi non sono la soluzione migliore, anche in considerazione del fatto che la sensibilità dei risultati rispetto ad esse è rilevante. Si renderebbe, quindi, opportuna la ricerca di un metodo automatico per il calcolo dei valori-peso migliori basato sul confronto, istante per istante, sia delle posizioni di giunto che delle forze scambiate al suolo.

3.7 Risultati delle simulazioni di salita di un gradino

Il modello è composto da 7 segmenti (fig. 3.21) ed i parametri antropometrici sono derivati dalle tabelle di Zatziorskij che consentono, a differenza di quelle di Winter, di separare il tronco in tre parti in modo da modellare il bacino separato dallo HAT. Lo schema di controllo proposto è mostrato in figura 3.22.

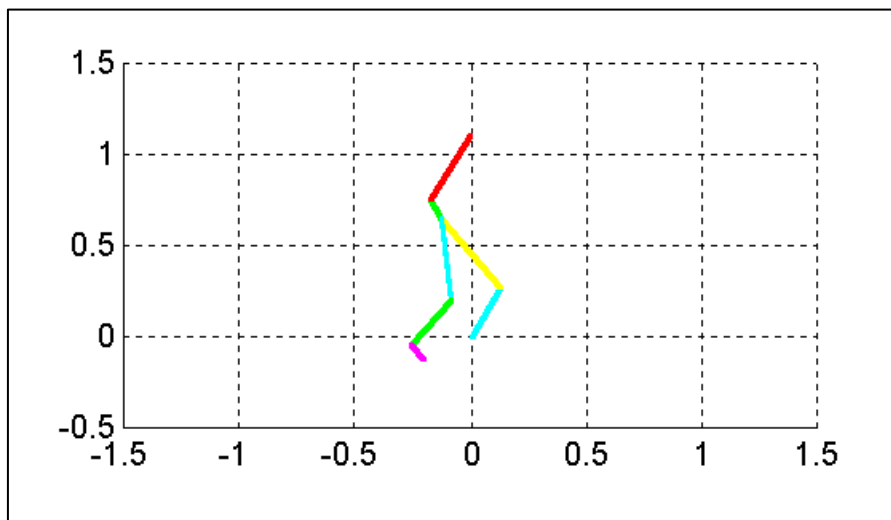


Figura 3.21

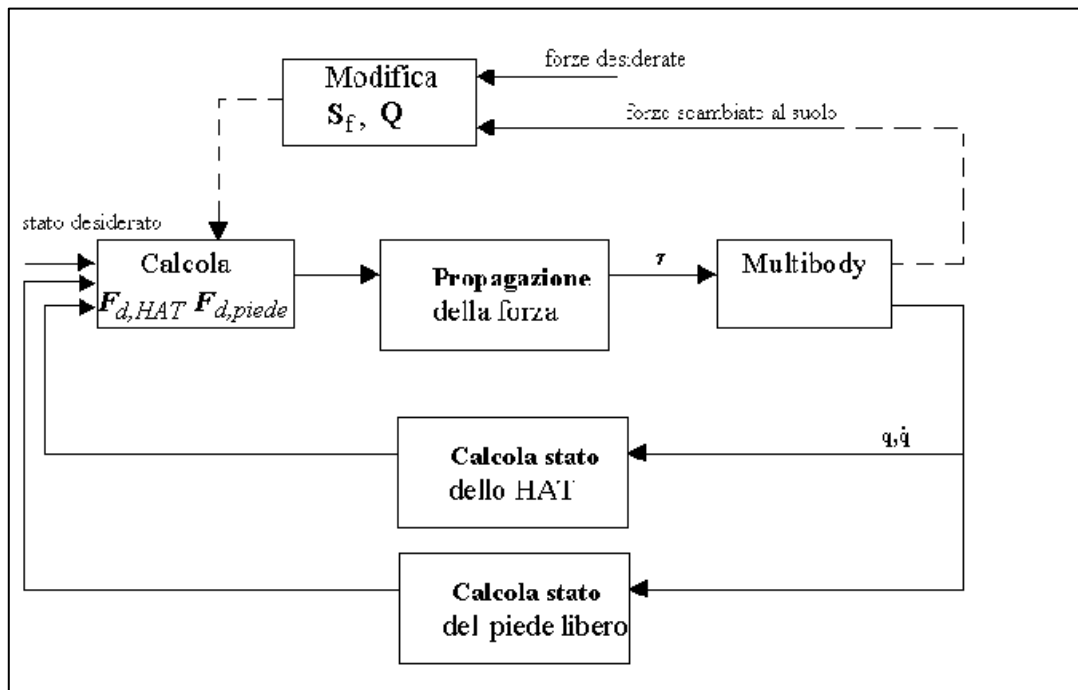


Figura 3.22

Dai risultati delle simulazioni effettuate (fig. successive) non è stato possibile trarre conclusioni accettabili in favore del controllo proposto.

Le difficoltà sorgono, probabilmente, per l'eccessiva semplificazione del modello nei confronti del compito e per l'analogia semplicità di controllo utilizzata.

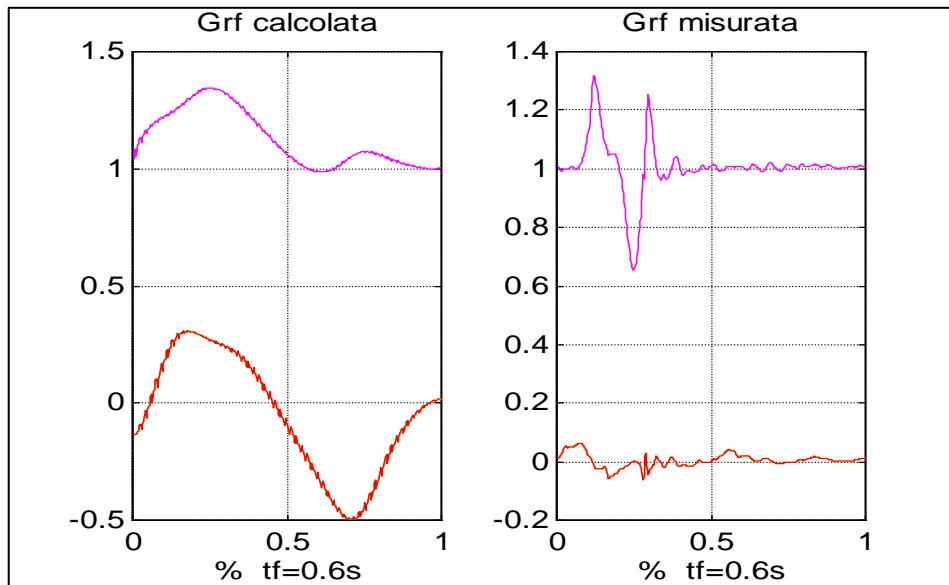


Figura 3.23

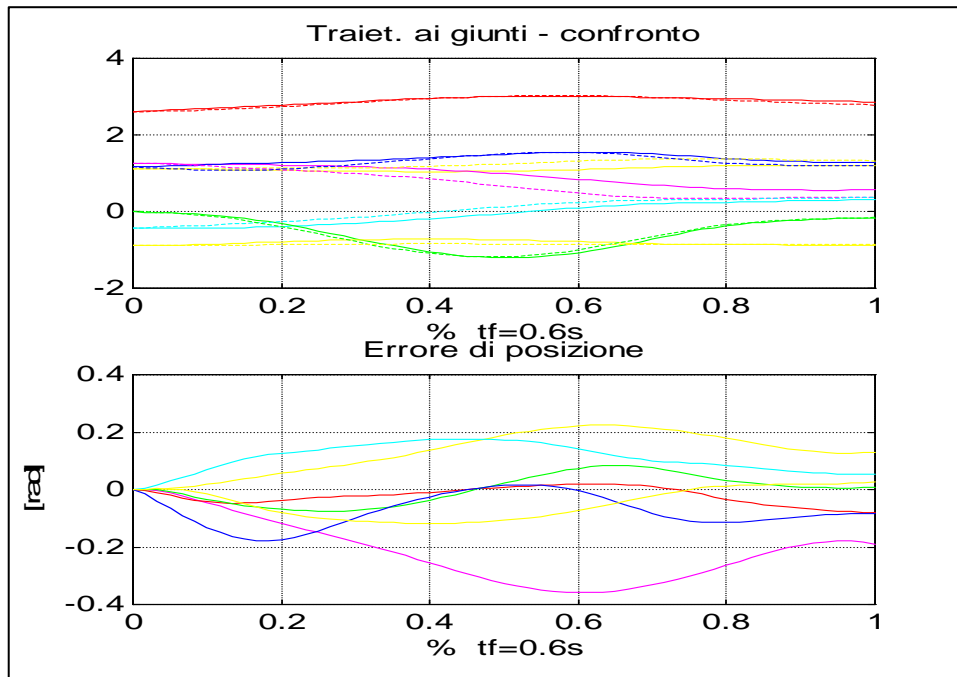


Figura 3.24

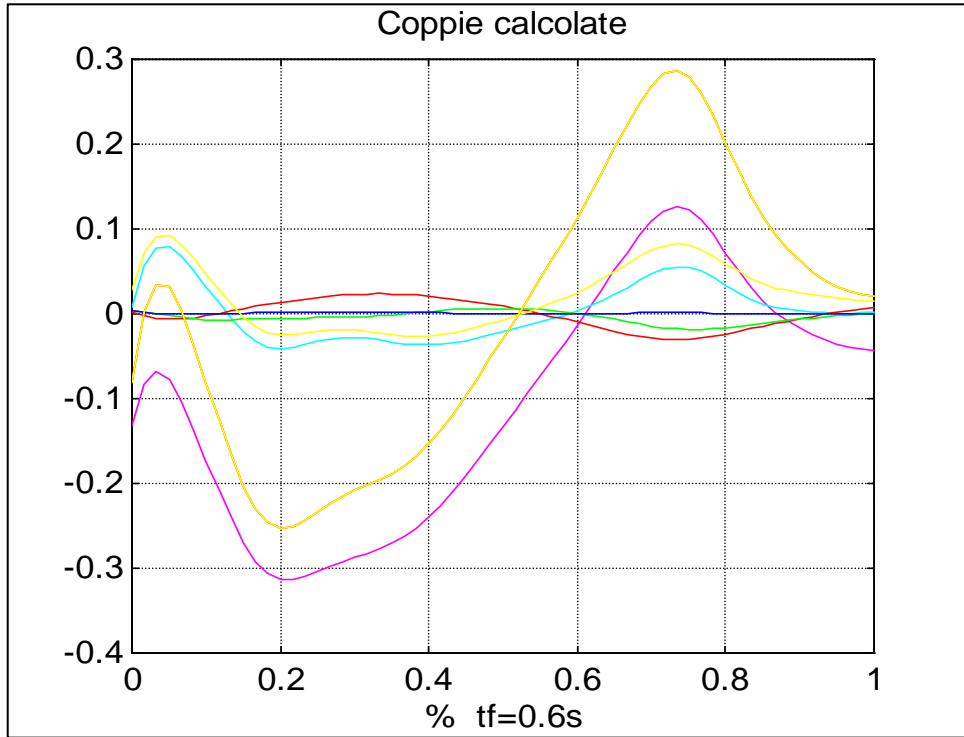


Figura 3.25

*Bibliografia specifica:*

- [1] P.Allard, A.Cappozzo et al. – “Three-dimensional Analysis of Human Locomotion”, Wiley.
- [2] D.Winter – “Biomechanics and motor control of human movement”, 2° ed.
- [3] Berme, A.Cappozzo – “Biomechanics of human movement”, Bertec 1990.
- [4] H.Hatze – “Quantitative analysis, synthesis and optimization of human motion”, Human Movement Sci., 1984, vol.3, pp. 5-25.
- [5] P.Allard, I.A.F.Stokes, J.P.Blanchi – “Three dimensional analysis of human movement”.
- [6] P.Kiriazov – “A new design criterion for controlled multibody systems”, Proc. of the 1996 IEEE Int. Symp. On CACSD.
- [7] M.Ascher, D.K.Pai, B.P.Cloutier – “Forward dynamics, elimination methods, and formulation stiffness in robot simulation”, Dep. of Comp. Sci. – Univ of British Columbia, Vancouver, 1996.
- [8] W.W.Armstrong – “recursive solution to the equations of motion of an n-link manipulator”, Proc. of the 5<sup>th</sup> World Congress on Theory of machines and mechanism, 1979.
- [9] R.E.Ellis, O.M.Ismaeil, I.H.Carmichael – “Numerical Stability of forward-dynamics algorithms”, Proc. of the IEEE Conf. on Rob. and Autom., 1992.
- [10] G.Rodriguez, A.Jain, K.Kreutz-Delgado – “A spatial operator algebra for manipulator modeling and control”, The Int. J. of Robotics and Autom., vol. 10(4), 1991.
- [11] D.D.Donskoj, V.M.Zatziorskij – “Biomeccanica”, Società Stampa Sportiva Roma.
- [12] L.A.Gilchrist, D.A.Winter – “A multisegment computer simulation of normal human gait”, IEEE Trans. on Rehabilitation Eng., vol.5, n°4, 1997.
- [13] I.Sharf, G.M.T.D’Eleuterio – “Computer simulation of elastic chains using a recursive formulation”, IEEE Int. J. of Rob. Res,1988.
- [14] L.Jalics, H.Hemami, B.Clymer – “A control strategy for adaptive bipedal locomotion”, Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., 1996.
- [15] R.Featherstone – “Robot dynamics algorithms”, Boston:Kluwer,1987.

[16] G.Rodriguez, K.Kreutz-Delgado – “Spatial operator algebra for multibody system dynamics”, J. Astronautical Sci., vol.40, n°1, 1992.

[17] M.Tibaldi, “Progetto di sistemi di controllo”, Pitagora Ed. Bologna.