

UNIVERSITÀ DI PISA



Facoltà di Ingegneria

Laurea Specialistica in Ingegneria dell'Automazione

Tesi di laurea

**Controllo robusto di forza per una struttura robotica articolata
di tipo Body Extender**

Candidato:

Gastone Pietro Rosati Papini

Relatori:

Prof. Carlo Alberto Avizzano

Controrelatore:

Prof. Antonio Bicchi

Sessione di Laurea del 28 Febbraio 2012
Anno accademico 2010/2011

Sommario

La tesi affronta la progettazione e la sintesi di un controllo robusto per un amplificatore di forza ad elevate prestazioni denominato *Body Extender*. Il *Body Extender* è un esoscheletro corpo intero a 22 gradi di libertà progettato e costruito dal laboratorio PERCRO della SCUOLA SUPERIORE SANT'ANNA di Pisa. Il sistema è concepito per essere indossato da un operatore umano e muoversi in coerenza con i suoi movimenti, sgravando i pesi e le inerzie della sua struttura e dei carichi trasportati. Il livello di compensazione del carico viene inoltre ridotto a una percentuale arbitraria, in modo da consentire una manipolazione naturale per l'operatore. Per tali motivi nella progettazione del controllo si è dovuto tenere conto della presenza dell'uomo che causa notevoli variazioni dei parametri (massa e rigidità), della elasticità della trasmissione, e delle differenti situazioni di esercizio della macchina, quali variazioni di carico e interferenza con l'ambiente. Il funzionamento della macchina deve garantire una adattività a tutti i suddetti effetti.

Il controllo realizza un comportamento dell'esoscheletro pari ad un amplificatore di forze; nel caso in cui il movimento dell'operatore sia libero risulta invece trasparente per l'utilizzatore. La struttura del controllo presenta due anelli principali: uno più interno che si occupa dell'inseguimento delle traiettorie, implementato con un controllo a dinamica inversa adattivo; mentre l'anello esterno genera il riferimento simulando la pura massa virtuale agli organi di presa. L'anello interno di controllo compensa inoltre l'elasticità concentrata ai giunti[1] annullandone gli effetti dinamici nell'intorno della traiettoria. L'anello esterno utilizza la forza misurata dal sensore per generare un riferimento in accelerazione che viene opportunamente integrato per determinare i riferimenti di velocità e posizione. Un ultimo modulo si occupa della stima delle forze esterne per la corretta amplificazione di forza e per il funzionamento del controllo in posizione. Considerando la natura non stazionaria del modello da identificare, la stima dei carichi viene effettuata con un operatore a media mobile basato su un algoritmo di regressione non lineare[2].

L'analisi della stabilità del sistema è stata effettuata tramite il luogo delle radici, e quindi verificata nei parametri incerti con il software Mathematica. È stata inoltre programmata un'interfaccia in python per il log e la visualizzazione realtime delle variabili di stato del sistema. L'implementazione del controllo progettata in ambiente Simulink di MATLAB usa il real-time Workshop opportunamente configurato, e può essere eseguire gli schemi direttamente nel robot. Sono state effettuate prove sperimentali su un modello di ridotta complessità per verificare le proprietà dinamiche degli algoritmi sviluppati. Sono infine stati effettuati test sulla struttura completa. I risultati delle prove sperimentali hanno evidenziato un accordo con l'analisi teorica realizzata sia in termini di stabilità sia di prestazione.

1 Introduzione

Il *Body Extender*[3], mostrato in fig. 1, è un esoscheletro completo a 22 gradi di libertà; è stato progettato e realizzato dal laboratorio *PERCRO*¹ della SCUOLA SUPERIORE SANT'ANNA di Pisa.

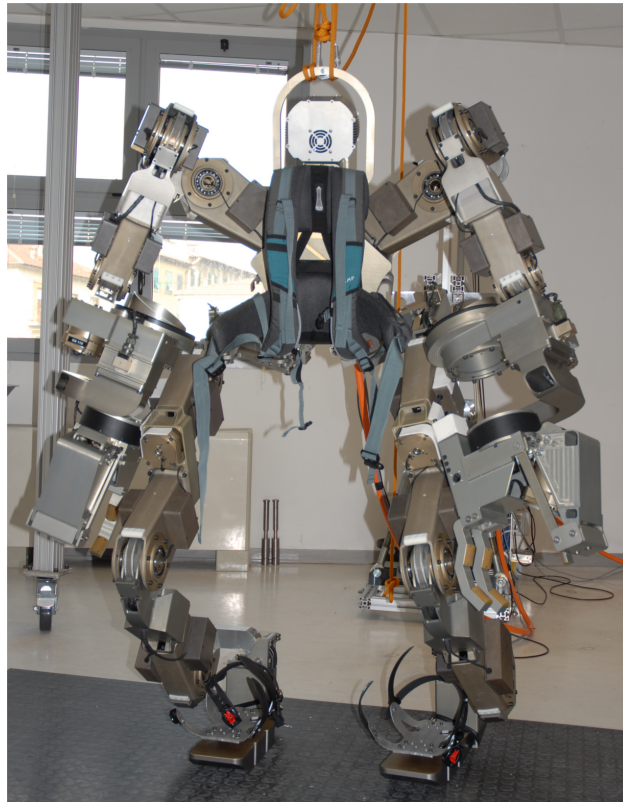


Figura 1: *Body Extender*.

Si tratta di un dispositivo progettato per consentire ad un operatore di sollevare e manipolare grossi carichi in ambienti non strutturati. Il *Body Extender* appartiene alla categoria di sistemi per l'amplificazione umana di forza, nota come *Exoskeletons for Human Performance Augmentation* (EHPA); la macchina esercita la parte preponderante della forza necessaria alla movimentazione del carico, lasciando comunque all'uomo una percezione delle forze applicate. Il *Body Extender* utilizza ventidue motori elettrici per attuare altrettanti gradi di libertà; la sensoristica utilizza cinque sensori di forza, ciascuno a sei assi, un accelerometro a tre gradi di libertà, e ventidue encoder incrementali uno per ogni motore.

Un sistema robotico autonomo può lavorare eccellentemente in ambienti strutturati, come ad esempio una fabbrica. Quando l'ambiente non è conosciuto e i task sono di varia tipologia, sfruttare la capacità cognitiva dell'uomo può essere invece la scelta più idonea. Nel caso in cui l'integrazione tra uomo e macchina è stretta ed il dispositivo robotico viene indossato dall'operatore per incrementarne la forza, allora tale dispositivo viene denominato "*extender*"[4]; l'uomo provvede ad un intelligente controllo del sistema, mentre gli attuatori dell'*extender* si occupano della forza necessaria per l'operazione. Un sistema per amplificazione di forza è generalmente caratterizzato da un dispositivo meccanico dotato di un'apposita interfaccia mediante la quale un operatore umano applica delle forze di comando. Tali forze sono replicate dallo stesso dispositivo che le esercita in maniera amplificata sull'ambiente esterno per mezzo di un organo atto all'esecuzione di un predefinito task.

¹<http://www.percro.org/>

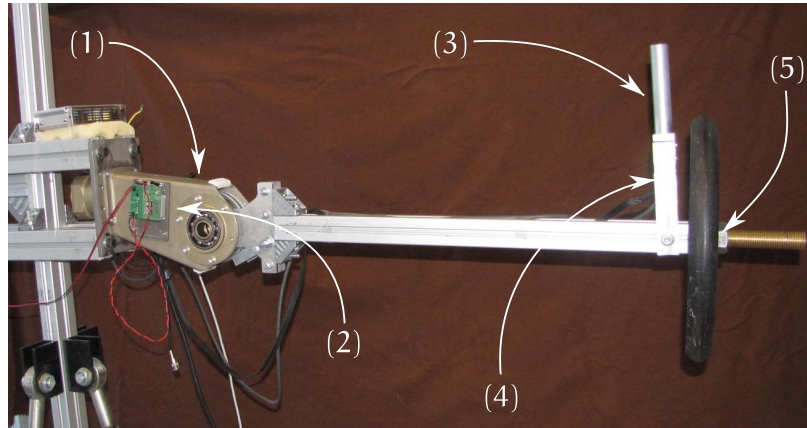


Figura 2: Struttura ad un grado di libertà, realizzata utilizzando il giunto trasversale del *Body Extender*.

Una caratteristica peculiare di questo tipo di sistemi è che i tre elementi principali (uomo, dispositivo ed ambiente) sono fisicamente collegati tra loro: il trasferimento delle informazioni di impedenza tipico dei sistemi di teleoperazione è qui ottenuto in modo meccanico. L'uomo diventa perciò parte integrante del sistema e "percepisce" cosa l'*extender* sta facendo sull'ambiente. I vantaggi per l'operatore consistono nella possibilità di esercitare senza affaticarsi forze di entità elevata o addirittura superiori alle sue capacità fisiche.

Vista la stretta interazione con l'uomo la scelta di un controllo che sia principalmente sicuro è doverosa. È stato quindi necessario individuare le principali caratteristiche dell'amplificatore di forza, così da poter progettare un controllo robusto. Scendendo più nel dettaglio, il *Body Extender* presenta alcune problematiche peculiari, tra cui:

- presenza di un *operatore umano* all'interno della struttura meccanica e del loop di controllo;
- vasta tipologia di condizioni operative;
- presenza di *giunti elastici*;
- sensori di posizione ai motori (encoder) e sensori di forza verso l'operatore umano;
- coppie al giunto elevate esercitate tramite uno stadio di riduzione che presenta una discreta efficienza.

In questo contesto, l'obiettivo del lavoro è progettare un controllo robusto, sicuro per l'operatore umano, e contemporaneamente performante e adattivo. In particolare:

- la stabilità del sistema dovrà essere garantita in tutte le condizioni operative;
- il sistema dovrà identificare il carico e adattarsi alle diverse condizioni di funzionamento;
- il comportamento sarà pari ad un *amplificatore di forza* che nel caso il movimento sia libero dovrà risultare il più *trasparente* possibile per l'utilizzatore.

Nella progettazione del controllo si è considerata la sensoristica e l'attuazione esistente.

Infine l'implementazione del controllo è stata svolta mediante l'ambiente Simulink di MATLAB. L'approccio seguito per il controllo è stato quello di focalizzarsi su un modello minimale

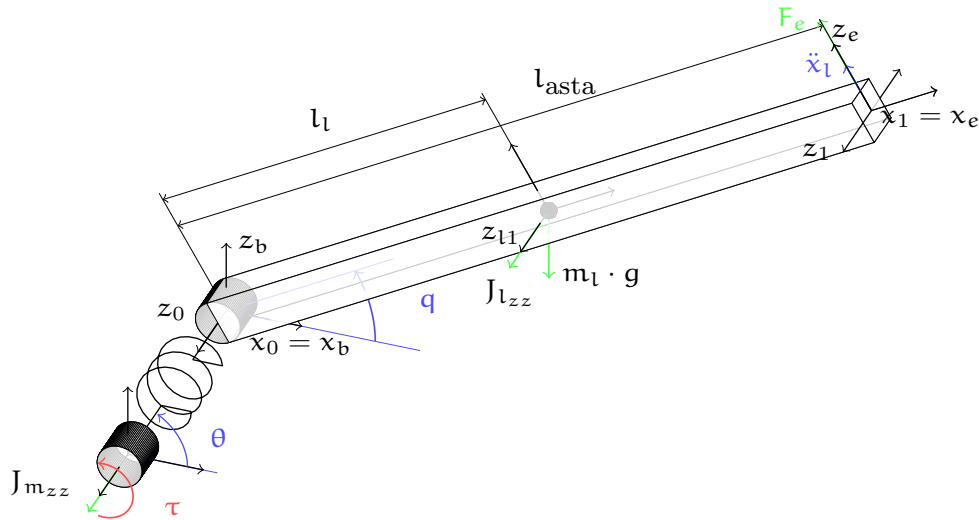


Figura 3: Modello del sistema ad un grado di libertà con elasticità concentrata.

per concentrarsi al meglio sulle problematiche del sistema precedentemente descritte. Esse sono evidenti anche nella struttura semplificata ad un solo grado di libertà mostrata in fig. 2. È quindi stato scelto di effettuare uno studio su una struttura di questo tipo. Lo studio del problema a un DOF permette infatti di analizzare le principali componenti di incertezza sui parametri, il comportamento dell'operatore, le non linearità delle dinamiche di attuazione e sensorizzazione. Inoltre, in presenza di elasticità concentrate i risultati raggiunti possono essere estesi a catene cinematiche aperte.

2 Il sistema a un grado di libertà

La fig. 2 mostra il sistema sperimentale usato per lo sviluppo del controllo[5]. Il sistema comprende: (1) un giunto rotoidale; (2) un controllore locale e le componenti di azionamento; (3) un sensore di forza sulla maniglia; (4) un accelerometro; (5) un sistema per la variazione del carico.

Il giunto rotoidale ha una coppia continua massima di 450 N m. La stessa tipologia di giunto è usata sia nelle zampe che nel braccio del *Body Extender*, di cui implementa dieci gradi di libertà dei 22 totali. Il giunto è attuato da un motore rotativo il cui angolo ridotto controlla linearmente la coordinata di giunto. Il rendimento complessivo del giunto trasversale è medio pari a circa 0,8. L'inerzia valutata all'asse di uscita è pari a 8,5 kg m². La rigidità all'asse di uscita è stata stimata ed è pari a circa $1,7 \times 10^4$ N m/rad. La rigidità del sistema complessivo che comprende anche l'asta risulta molto più bassa intorno a 1×10^4 N m/rad.

La comunicazione con il pc per il controllo avviene tramite una rete EtherCAT. Il controllo viene compilato direttamente da uno schema Simulink e comunica con il driver utilizzando il bus EtherCAT, e riceve in feedback i dati dei sensori: encoder, sensore di forza e di accelerazione.

2.1 Modellazione

La fig. 3 mostra il modello cinematico del giunto. Si indicano con q e θ , la posizione del giunto e del motore, con \dot{q} e $\dot{\theta}$, le rispettive velocità. Il sistema mostrato in fig. 3 e presenta elasticità e viscosità concentrate k_t, c_t . Utilizzando la notazione in [1] il sistema elastico può essere descritto

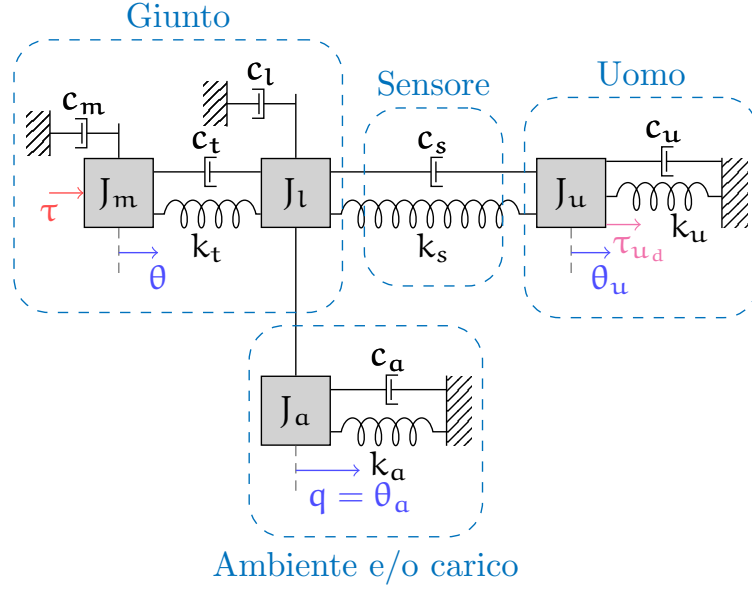


Figura 4: Modello lineare del sistema completo.

dalle seguenti equazioni:

$$J_l \ddot{q} + k_t(q - \theta) + c_t(\dot{q} - \dot{\theta}) + m_l l_1 g \cos q = \tau_e, \quad (1)$$

$$J_m \ddot{\theta} + k_t(\theta - q) + c_t(\dot{\theta} - \dot{q}) = \tau, \quad (2)$$

in cui si è indicato con J_l e J_m , il momento di inerzia al giunto e al motore, con M_l , l_{asta} , la massa e la lunghezza del link, con l_1 la posizione del baricentro, e con τ_e , τ le coppie applicate rispettivamente al link e al motore. In particolare possono essere utilizzate le seguenti equivalenze $J_l = m_l l_1^2 + J_{l_{zz}}$, $\tau_e = F_e l_{asta}$, $J_m = J_{m_{zz}}$, in cui con F_e si indicano tutte le forze di interazione con l'esterno uomo e ambiente. In assenza di gravità il modello elastico del giunto mantiene proprietà lineari.

Modellando in aggiunta la dinamica dell'uomo, del sensore e dell'ambiente, il sistema completo è rappresentabile attraverso le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} J_m \ddot{\theta} &= \tau + k_t(q - \theta) + c_t(\dot{q} - \dot{\theta}) - c_m \dot{\theta}, \\ (J_l + J_a) \ddot{q} &= k_t(\theta - q) + k_s(\theta_u - q) + c_t(\dot{\theta} - \dot{q}) + \\ &\quad + c_s(\dot{\theta}_u - \dot{q}) - c_l \dot{q} - k_a q - c_a \dot{q}, \\ J_u \ddot{\theta}_u &= \tau_{u_d} + k_s(q - \theta_u) - k_u \theta_u + c_s(\dot{q} - \dot{\theta}_u) - c_u \dot{\theta}_u, \\ \tau_s &= k_s(\theta_u - q) + c_s(\dot{\theta}_u - \dot{q}), \end{aligned} \quad (3)$$

in cui sono state indicate le grandezze relative all'uomo e all'ambiente rispettivamente con i pedici u , a ; τ_s è la coppia misurata al sensore e τ_{u_d} è la coppia complessiva esercitata dall'uomo sulla propria muscolatura e sul carico. I parametri noti del modello identificati sperimentalmente sono:

- $J_m \simeq 8,5 \text{ kg m}^2$ e $J_l \simeq 1 \text{ kg m}^2$, inerzie del motore e del giunto;
- $c_m \simeq 8 \text{ N s m}$ e $c_l \simeq 0 \text{ N s m}$, smorzamento sul motore e sul giunto;
- $k_t \simeq 10 \times 10^3 \text{ N m}$ e $c_t \simeq 20 \text{ N s m}$; parametri di trasmissione;
- $k_s \simeq 3 \times 10^6 \text{ N m}$ e $c_s \simeq 50 \text{ N s m}$; parametri del sensore di forza.

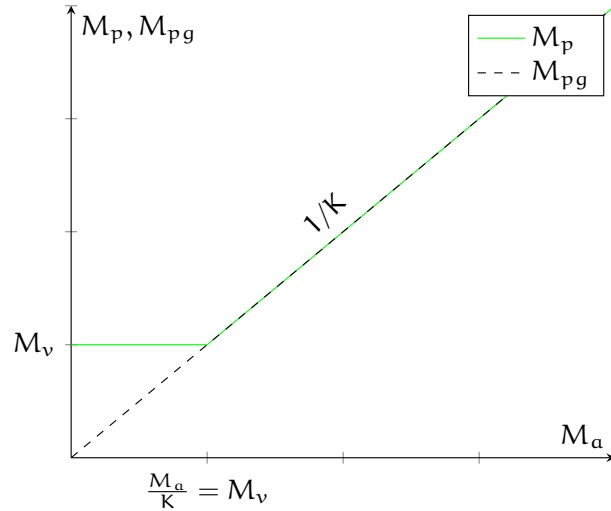


Figura 5: Funzionamento ideale del controllo al variare di M_a .

Mentre i parametri variabili sono:

- $0 < J_a < 32 \text{ kg m}^2$, $0 < k_a < \text{inf}$ e $0 < c_a < \text{inf}$, parametri dell'ambiente;
- $0,05 < J_u < 4 \text{ kg m}^2$, $50 < k_u < 5000 \text{ N m}$ e $3 < c_u < 300 \text{ N s m}$, parametri dell'uomo.

La fig. 4 rappresenta uno schema a blocchi concentrati equivalenti il modello descritto.

3 Progettazione del controllo

In assenza di carico l'obiettivo del controllo è ottenere un comportamento il più possibile trasparente per l'operatore. Quando invece l'operatore manipola carichi si desidera che esso percepisca un frazione della forza interscambiata dall'extender. Riassumendo in due leggi matematiche i suddetti comportamenti abbiamo:

$$F_s = M_v \ddot{x}_l, \quad \text{moto libero} \quad (4)$$

$$F_s = \frac{F_a}{K}, \quad \text{moto soggetto a carico} \quad (5)$$

dove si è indicato con F_s , la forza misurata dal sensore, con F_a , la forza applicata dall'ambiente sull'extender, con M_v , K la massa simulata e la costante di amplificazione utilizzata dall'algorithmo di controllo.

È possibile unire le due leggi in una formulazione lineare a tratti che determini un inseguimento con massa virtuale uguale a M_v , se l'esoscheletro non è soggetto a forze esterne; in presenza di carichi sarà invece presente il termine destro dell'eq. (5). Per semplicità si considera la forza F_a come generata solo da due componenti: una inerziale e una gravitazionale.

$$F_a = M_a \ddot{x}_l + M_a g,$$

dove M_a è la massa del carico trasportato. Il comportamento complessivo del controllo sarà quindi:

$$F_s = \begin{cases} M_v \ddot{x}_l & M_a = 0 \\ M_v \ddot{x}_l + \frac{M_a}{K} g & M_a \neq 0 \ \& \ \frac{M_a}{K} < M_v \\ \frac{M_a}{K} \ddot{x}_l + \frac{M_a}{K} g & \frac{M_a}{K} \geq M_v \end{cases} \quad (6)$$

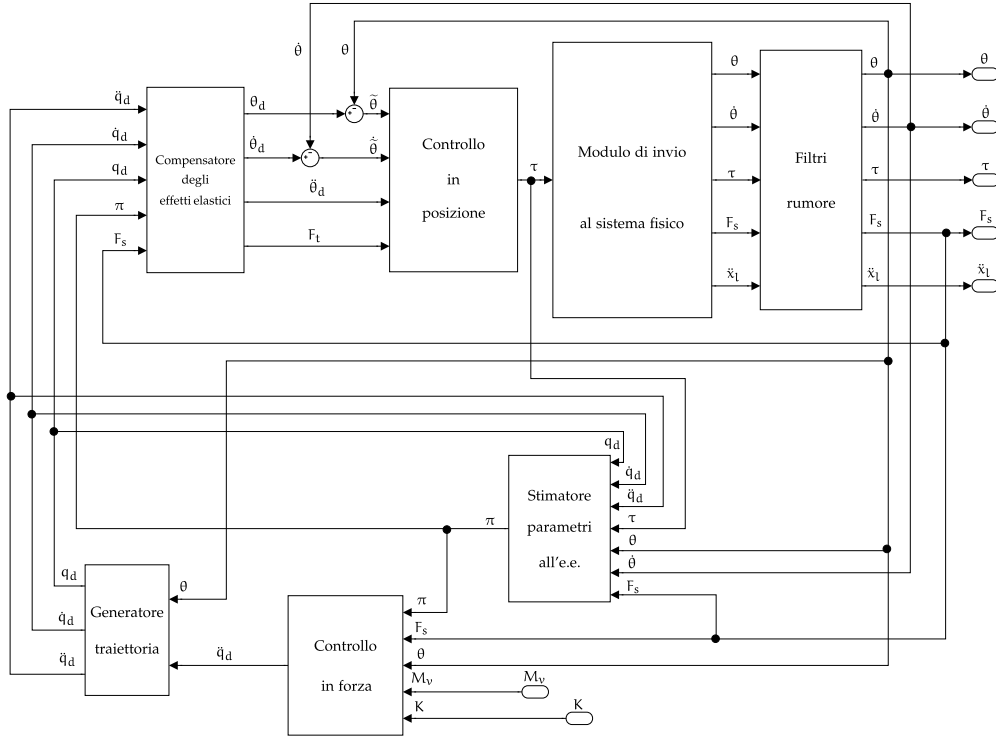


Figura 6: Schema di controllo implementato.

La fig. 5 mostra la massa percepita dall'operatore al variare del carico stimato. Più precisamente sono state indicate con M_p la componente inerziale (il coefficiente di \ddot{x}_l), e con M_{pg} la componente dovuta alla gravità. Il controllo consente di modificare l'andamento del grafico agendo sui due parametri indipendenti M_v , K .

Il controllo progettato si basa su una struttura a doppio anello di retroazione. L'anello più interno utilizza un controllo in posizione a dinamica inversa per sistemi elastici strutturato in modo da compensare gli effetti sia di forze ambientali che di forze dovute all'operatore. L'anello esterno genera invece una traiettoria in posizione, velocità e accelerazione per l'anello interno, simulando come visto precedentemente una massa variabile M_p , M_{pg} . Esiste infine un terzo anello necessario alla stima delle forze esterne. La struttura completa è mostrata in fig. 6. Per lo sviluppo dell'anello di controllo in forza si è proceduto a generalizzare il controllo presentato in [1] adattandolo al modello descritto in eq. (3).

3.1 Anello di posizione

Consideriamo l'equazione di un sistema robotico con elasticità concentrate inserendo anche il termine dovuto alle forze esterne situate all'E.E. (\mathbf{h}_e). Facendo riferimento a [1] per la notazione utilizzata:

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}_t(\boldsymbol{\theta} - \mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (7)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_t(\mathbf{q} - \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{h}_e, \quad (8)$$

in cui si è definito con $\mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) := \mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q})$. Per rimuovere le informazioni sulle variabili al giunto non direttamente osservate dalla sensoristica si può operare una derivazione dell'eq. (8)

fino a ottenere il termine $\ddot{\theta}$. In questo modo:

$$\dot{\mathbf{B}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{q}^{[3]} + \dot{\mathbf{n}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_t(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\theta}) = \dot{\mathbf{J}}^T(\mathbf{q})\mathbf{h}_e + \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\dot{\mathbf{h}}_e, \quad (9)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{q}^{[4]} + \mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}^{[3]}) + \mathbf{K}_t(\ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\theta}) = \ddot{\mathbf{J}}^T(\mathbf{q})\mathbf{h}_e + 2\dot{\mathbf{J}}^T(\mathbf{q})\dot{\mathbf{h}}_e + \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{h}}_e, \quad (10)$$

dove si utilizza $\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}^{[3]}) = \dot{\mathbf{B}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + 2\dot{\mathbf{B}}(\mathbf{q})\mathbf{q}^{[3]} + \ddot{\mathbf{n}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$. Otteniamo così un'inversione cinematica nell'intorno di una traiettoria desiderata che risulta indipendente dalle variabili di giunto:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\ddot{\theta}_d + \mathbf{K}_t(\theta_d - q_d) + \mathbf{K}_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \mathbf{K}_p(\theta_d - \theta).$$

Questa legge di controllo permette di inseguire una traiettoria al motore. Al fine di definire una traiettoria desiderata al giunto, possono essere esplicitati i termini $\ddot{\theta}_d$, $\dot{\theta}_d$, θ_d , a partire dalle equazioni 9, 10, come segue:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_d &= \mathbf{K}_t^{-1} \left(\mathbf{B}(\mathbf{q}_d)\mathbf{q}_d^{[4]} + \mathbf{c}(\mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d, \ddot{\mathbf{q}}_d, \mathbf{q}_d^{[3]}) - \dot{\mathbf{J}}^T(\mathbf{q}_d)\hat{\mathbf{h}}_e - 2\dot{\mathbf{J}}^T(\mathbf{q}_d)\dot{\hat{\mathbf{h}}}_e - \mathbf{J}^T(\mathbf{q}_d)\ddot{\hat{\mathbf{h}}}_e \right) + \ddot{\mathbf{q}}_d, \\ \dot{\theta}_d &= \mathbf{K}_t^{-1} \left(\mathbf{B}(\mathbf{q}_d)\mathbf{q}_d^{[3]} + \dot{\mathbf{B}}(\mathbf{q}_d)\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{n}}(\mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d) - \dot{\mathbf{J}}^T(\mathbf{q}_d)\hat{\mathbf{h}}_e - \mathbf{J}^T(\mathbf{q}_d)\dot{\hat{\mathbf{h}}}_e \right) + \dot{\mathbf{q}}_d, \\ \theta_d &= \mathbf{K}_t^{-1} \left(\mathbf{B}(\mathbf{q}_d)\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d) - \mathbf{J}^T(\mathbf{q}_d)\hat{\mathbf{h}}_e \right) + \mathbf{q}_d. \end{aligned} \quad (11)$$

Inserendo così le traiettorie desiderate al giunto, (q_d) , si otterranno le traiettorie corrette al motore da utilizzare nella eq. (3.1). In eq. (11) si è indicato con $\hat{\mathbf{h}}_e$ la stima delle forze esterne. Inserendo la legge di controllo nell'eq. (7), sostituendo tutti i termini in θ , θ_d con termini in \mathbf{q} , \mathbf{q}_d , ed effettuando una serie di passaggi algebrici, si ottiene la seguente struttura dinamica dell'errore di inseguimento al giunto:

$$\mathbf{M}\ddot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{K}_v\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{e}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \ddot{\tilde{\mathbf{q}}}, \tilde{\mathbf{q}}^{[3]}, \tilde{\mathbf{q}}^{[4]}, \tilde{\mathbf{h}}_e, \dot{\tilde{\mathbf{h}}}_e, \ddot{\tilde{\mathbf{h}}}_e),$$

dove \mathbf{e} dipende in maniera non lineare dall'errore di inseguimento e linearmente dall'errore di stima di \mathbf{h}_e . Localmente il controllo genererà l'inseguimento della traiettoria voluto se la stima delle forze esterne sarà sufficientemente accurata.

Il termine \mathbf{h}_e rappresenta le forze/coppie complessive esercitate dall'esterno sull'E.E. in generale esse corrispondono al contributo di forze/coppie generato dall'operatore uguale a \mathbf{F}_s che riportato al giunto sarà $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F}_s$, ai contributi inerziali del carico trasportato $M_a\ddot{\mathbf{x}}$ e $\mathbf{I}_a\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_a\boldsymbol{\omega}$ e al peso stesso del carico $M_a\mathbf{g}$. Tali forze possono essere ricondotte alle variabili di giunto utilizzando la consueta equazione $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\boldsymbol{\omega}_e$. Nel caso del modello ridotto in esame, $\mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{h}_e = \boldsymbol{\tau}_s + \hat{\mathbf{J}}_a\ddot{\mathbf{q}}$.

Una volta compensata la gravità, sarà perciò possibile, senza perdita di generalità, ottenere la seguente legge di controllo:

$$\boldsymbol{\tau} = J_m\ddot{\theta}_d + k_t(\theta_d - q_d) + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_p(\theta_d - \theta) \quad (12)$$

$$\theta_d = \frac{((J_l + \hat{J}_a)s^2 + c_t s + k_t)}{c_t s + k_t} q_d - \frac{\boldsymbol{\tau}_s}{c_t s + k_t}. \quad (13)$$

Definendo $A = (J_m s^2 + K_v s + K_p)$ e inserendo la legge di controllo eq. (12) nell'eq. (3) si ottiene:

$$0 = (A + c_t s + k_t)(\theta_d - \theta) + (c_t s + k_t)(q - q_d).$$

Se inseriamo poi i valori di θ_d e θ ,

$$((A(J_l s^2 + 1) + J_l(c_t s + k_t))^2)(q - q_d) = (A + c_t s + k_t)(J_a q - \hat{J}_a q_d)$$

Il polinomio risultante è di sesto grado e analizzando i coefficienti di ROUTH si può verificare che il sistema risulta sempre stabile. Si nota che non compare nessun termine dovuto all'uomo in quanto questo è stato compensato in eq. (13), utilizzando la misura del sensore di forza $\boldsymbol{\tau}_s$.

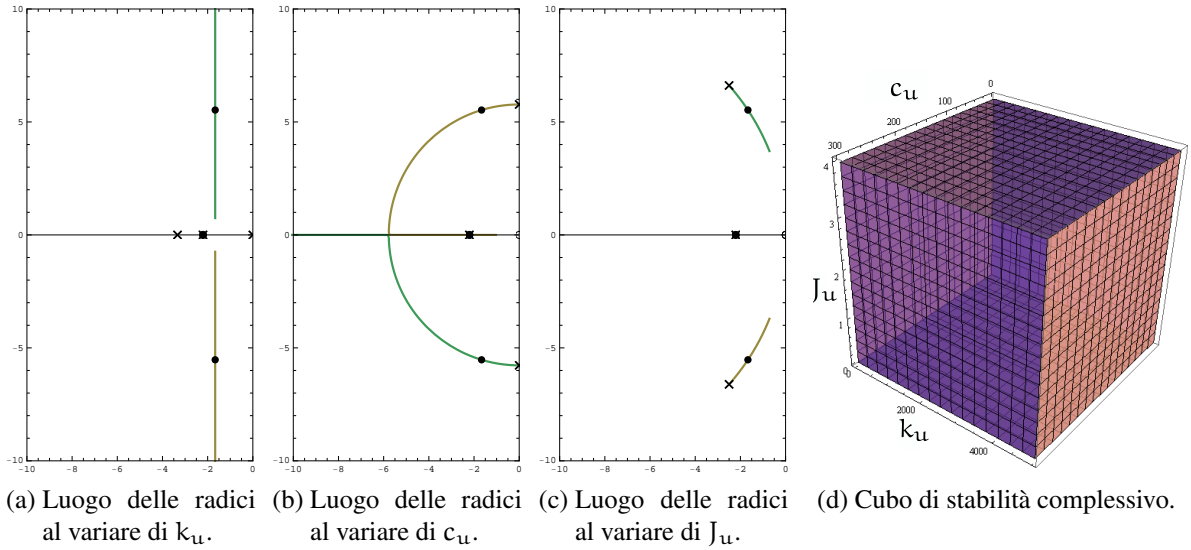


Figura 7: Luoghi delle radici e cubo di stabilità al variare dei parametri umani.

3.2 Anello di forza

L'anello di forza viene chiuso imponendo l'eq. (6) in cui si definisce una legge non lineare di inseguimento per determinare il valore dell'accelerazione all'E.E.. La stabilità del sistema complessivo è stata analizzata in maniera analoga al caso dell'anello di posizione. Considerato che alcuni parametri (\hat{J}_a , k_u , c_u , J_u) sono incerti, la stabilità complessiva del sistema in anello chiuso è stata analizzata tramite il criterio di Routh sul polinomio caratteristico dell'anello in forza. Nel caso in cui la stima di J_a sia sufficientemente accurata il sistema risulta stabile. La stabilità è mostrata nei luoghi delle radici in fig. 7; ognuno di essi è stato determinato considerando variabile uno dei parametri incerti, considerando quindi costante l'effetto degli altri.

Per poter rappresentare la stabilità del sistema alle variazioni di tutti i parametri contestualmente si è scelto di adottare una rappresentazione tridimensionale. In particolare si sono utilizzati dei *cubi di stabilità* in cui in ogni asse viene considerata la variazione di uno dei parametri incerti o del controllo. La condizione di stabilità è ottenuta tramite l'applicazione del criterio di Routh. Un cubo pieno indica che il sistema è sempre stabile al variare dei parametri in esame; se il sistema assume comportamenti instabili in un intervallo di variazione di un parametro, la rispettiva zona del cubo risulterà vuota. La figura 7d generalizza la condizione di stabilità già verificata in fig. 7.

In fig. 8 vengono invece mostrate alcune situazioni critiche. In particolare in fig. 8a si evince che la scelta di M_v non può essere arbitraria; nello specifico al diminuire della massa dell'uomo percepita dal sistema esso dovrà assumere valori consistenti. Lo stesso vale se il valore di \hat{J}_a si discosta (inferiormente) troppo dal valore di J_a come mostrato in fig. 8b, in cui $J_a = 30 \text{ kg m}^2$. Infine in fig. 8c si mostrano le condizioni di stabilità al variare della elasticità dell'uomo.

3.3 Stimatore dei parametri

La stima dei parametri è costruita supponendo il modello completamente rigido in quanto l'aggiornamento della stima viene effettuato con frequenza non interferente con la dinamica del controllo. Essa utilizza un filtro a finestra mobile sui campioni e sulla postura rilevati dal sensore come

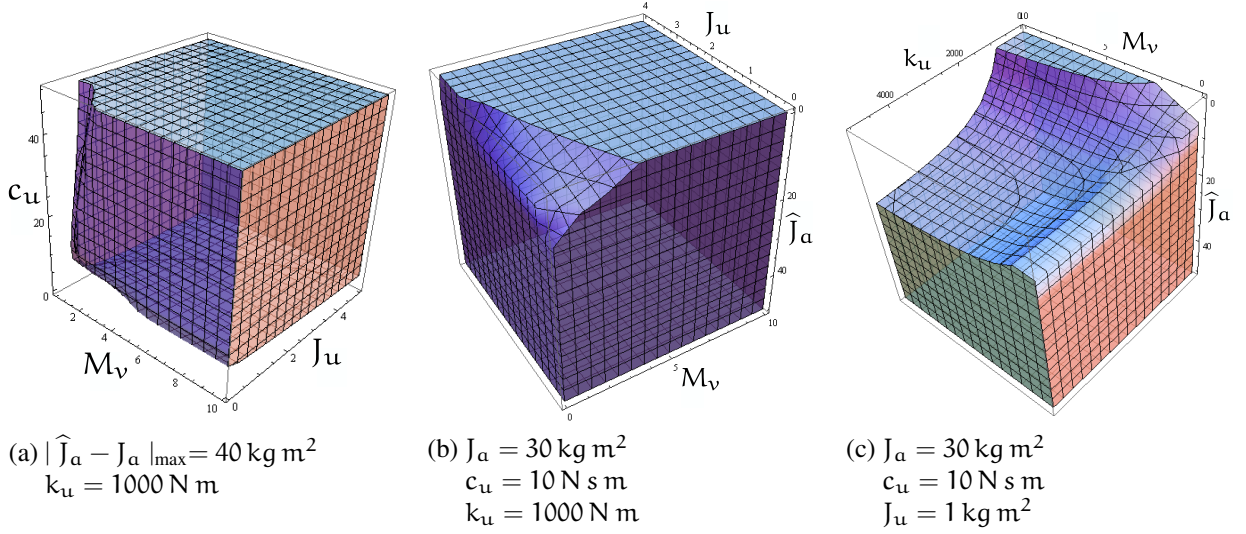


Figura 8: Cubi di stabilità al variare di alcuni parametri incerti o del controllo.

ingresso al regressore di stima. Definiamo le variabili velocità e accelerazione di riferimento[6]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{q}}_r &= \dot{\mathbf{q}}_d + \Lambda(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}), \\ \ddot{\mathbf{q}}_r &= \ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}).\end{aligned}$$

In analogia con i filtri FIR il regressore viene aggiornato con operazioni di shift a ridotto costo computazionale, stessa cosa per le forze:

$$\mathbf{Y}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}(\mathbf{q}[1], \dot{\mathbf{q}}_r[1], \ddot{\mathbf{q}}_r[1]) \\ \mathbf{Y}(\mathbf{q}[2], \dot{\mathbf{q}}_r[2], \ddot{\mathbf{q}}_r[2]) \\ \vdots \\ \mathbf{Y}(\mathbf{q}[n], \dot{\mathbf{q}}_r[n], \ddot{\mathbf{q}}_r[n]) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}[1] + \mathbf{J}^T(\mathbf{q}[1])\mathbf{F}_s[1] \\ \boldsymbol{\tau}[2] + \mathbf{J}^T(\mathbf{q}[2])\mathbf{F}_s[2] \\ \vdots \\ \boldsymbol{\tau}[n] + \mathbf{J}^T(\mathbf{q}[n])\mathbf{F}_s[n] \end{bmatrix}.$$

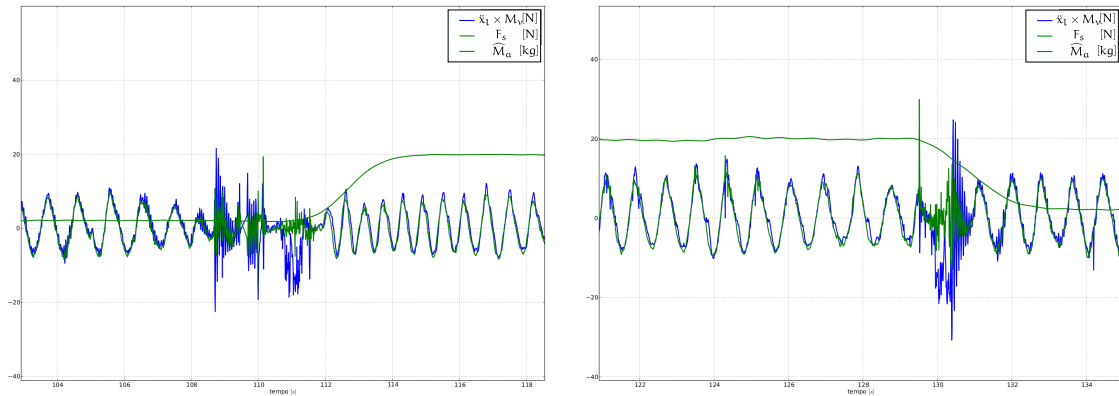
Il vettore dei parametri in definitiva risulterà:

$$\boldsymbol{\pi} = (\mathbf{Y}_e^T \mathbf{Y}_e)^{-1} \mathbf{Y}_e^T \mathbf{\Gamma}.$$

4 Risultati sperimentali

Nel seguito vengono mostrati dei risultati sperimentali significativi per il sistema in esame. La fig. 9 mostra l'andamento delle variabili di forza e accelerazione nelle operazioni di carico e scarico in condizioni di funzionamento da inseguitore puro (la forza di gravità e l'inerzia del carico non sono percepite) come da eq. (4). Si nota che le variabili rimangono in fase durante l'operazione, e che sono evidenti le fasi di urto iniziale con il carico nei transitori. Viene mostrato inoltre il valore identificato della massa del carico.

In figura 10 viene mostrato invece l'andamento delle variabili di forza e accelerazione nell'operazione di carico del sistema che segue la legge complessiva descritta in eq. (6). La massa percepita dall'uomo è circa un decimo di quella stimata conseguentemente al valore scelto per K. Infine la strategia di controllo implementata è stata confrontata in termini di prestazioni con una



(a) Operazione di carico.

(b) Operazione di scarico.

Figura 9: Operazione di carico e scarico, con massa virtuale costante.

metodologia di controllo differente precedentemente sviluppata per il *Body Extender*. Si tratta di un controllo in velocità che simula una viscosità. Il confronto viene effettuato con dei grafici nel piano forza-accellerazione per quanto riguarda il caso della tecnica implementata, e nel piano forza-velocità e forza-accellerazione per il caso del controllo in velocità (fig. 11b). I risultati (fig. 11b) mostrano come nel caso implementato il controllo realizza la legge ideale, rappresentata dalla retta in rosso. Il coefficiente angolare della retta dipenderà dal valore della massa virtuale, che nel confronto è uguale a 1. L'andamento del sistema con il controllo preesistente presenta oltre che un risultato in termini di prestazione inferiore, gravi problemi di stabilità.

In conclusione il lavoro svolto ha riportato buoni risultati in termini di prestazioni e robustezza: l'analisi teorica di stabilità è stata confermata dai risultati sperimentali effettuati sul sistema reale, anche in presenza delle incertezze dovute all'operatore umano.

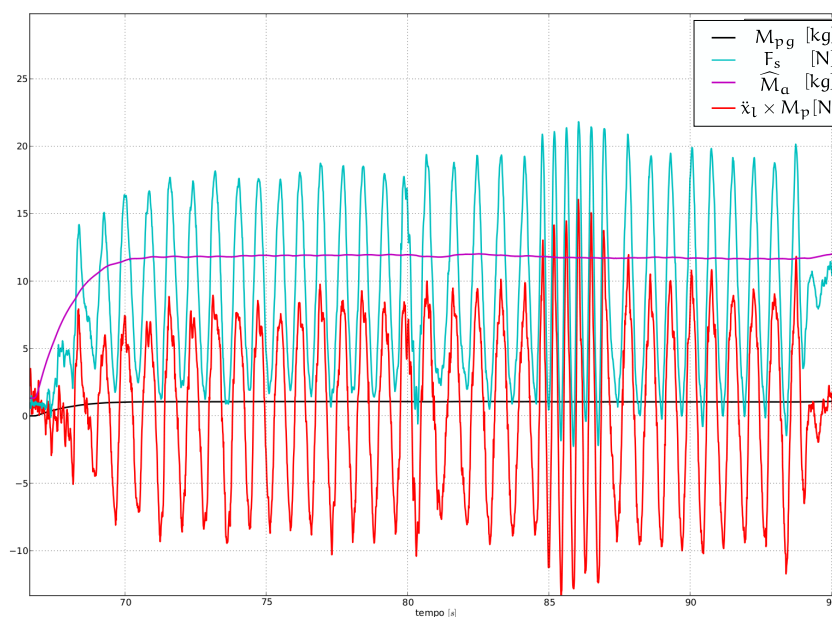
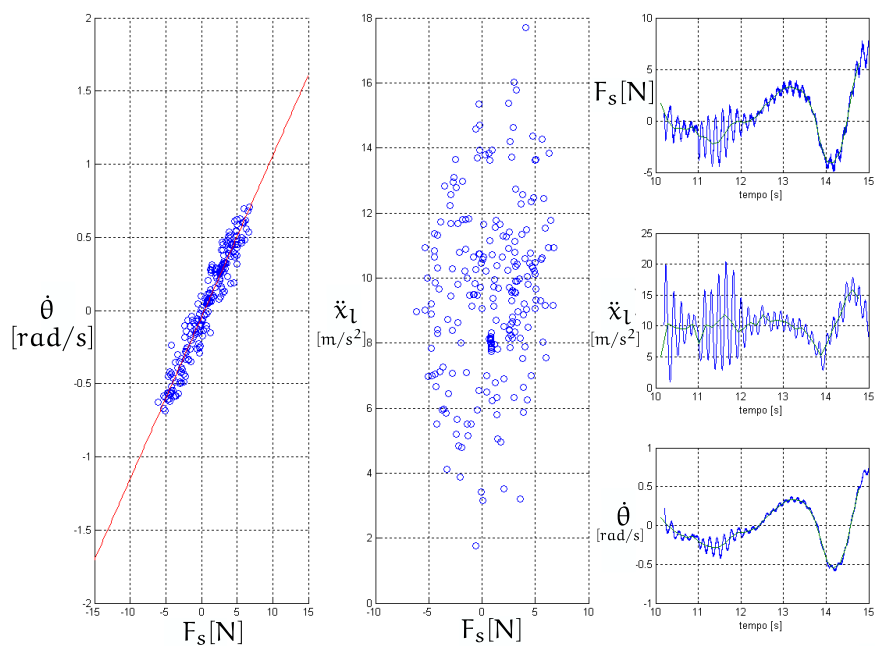
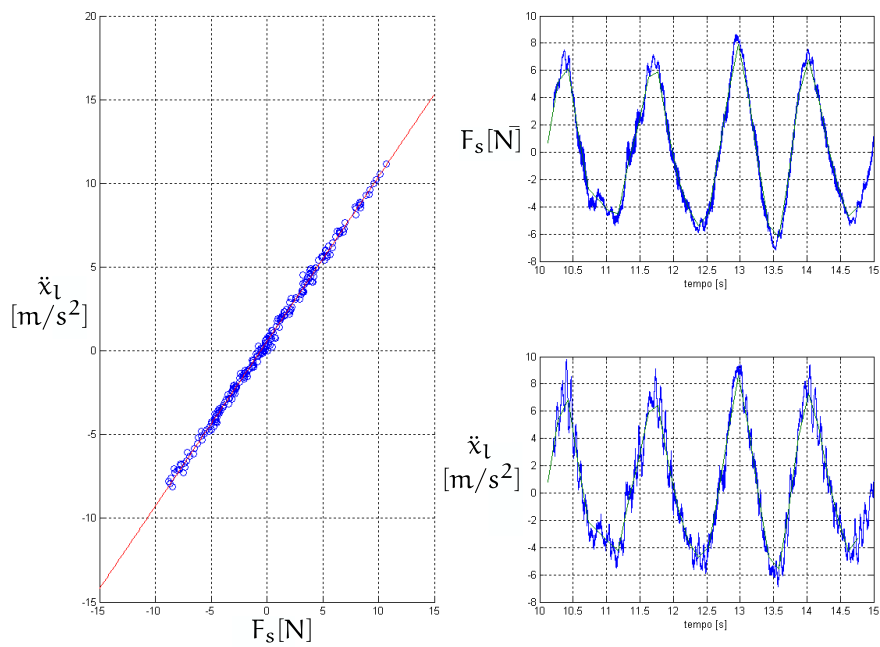


Figura 10: Operazione di carico, con controllo ad amplificazione.



(a) Valori di prestazione sul precedente controllore.



(b) Valori di prestazione del controllo realizzato.

Figura 11

Riferimenti bibliografici

- [1] Alessandro De Luca and Wayne Book. *Springer Handbook of Robotics*, chapter 13 Robots with Flexible Elements. Springer, 2008. [1](#), [4](#), [7](#)
- [2] Marco Gabiccini and Antonio Bicchi. *Slides di robotica I*, 2010. [1](#)
- [3] Simone Marcheschi. *Algoritmi di controllo per sistemi di amplificazione di forza*. PhD thesis, Scuola superiore Sant'Anna, May 2009. [2](#)
- [4] Homayoon Kazerooni. *Springer Handbook of Robotics*, chapter 33 Exoskeletons for Human Performance Augmentation. Springer, 2008. [2](#)
- [5] Massimo Bergamasco, Fabio Salsedo, Simone Marcheschi, Nicola Lucchesi, and Marco Fontana. A novel compact and lightweight actuator for wearable robots. In *Robotics and Automation, 2010. ICRA 2010. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on*, pages 4197–4203. IEEE, May 2010. [4](#)
- [6] Antonio Bicchi. *Dispense di robotica II*, 2009. [10](#)