

Controllo di manipolatori flessibili mediante retroazione visiva

Luca Bascetta

Nell'articolo si presentano i risultati di una tesi di dottorato finalizzata ad investigare l'incremento di prestazione ottenibile nel controllo di manipolatori flessibili allorché il sistema di controllo disponga non solo delle misure standard di posizione e deformazione dei bracci, ma anche di una misura visiva fornita da una telecamera montata sull'organo terminale. Il problema di controllo è stato affrontato mediante la teoria del controllo a due scale di tempo, con l'obiettivo di sfruttare l'informazione visiva non soltanto per il posizionamento del manipolatore, ma anche per la stima e lo smorzamento delle vibrazioni della struttura meccanica.

Keyword

Manipolatori flessibili, controllo visual servoing, controllo a due scale di tempo, filtraggio alla Kalman

Negli ultimi dieci anni sia la ricerca che il mondo industriale hanno mostrato un crescente interesse per alcune tematiche riguardanti i sistemi di controllo del moto. In particolare, alcuni ricercatori si sono dedicati allo studio di una metodologia razionale per la taratura di tali sistemi, al fine di stabilire una relazione tra i limiti alle prestazioni ottenibili sperimentalmente da un sistema di controllo del moto e le caratteristiche meccaniche del sistema stesso ([1], [3], [4], [6]).

Tali ricerche hanno evidenziato che uno dei principali ostacoli al progetto di sistemi di posizionamento con elevate prestazioni in termini di accuratezza e velocità di risposta, e basati unicamente sulla misura della posizione motore, è la presenza di flessibilità negli organi di trasmissione del moto. Per questo motivo, la modellistica di strutture meccaniche flessibili ha assunto particolare rilevanza anche in ambito applicativo. La flessibilità dei materiali può avere carattere concentrato o distribuito. La flessibilità concentrata è tipica dei sistemi attuati mediante organi di trasmissione e riduzione del moto, in cui catene di ingranaggi o harmonic drive posso introdurre elasticità torsionali. La flessibilità distribuita, invece, è presente nei manipolatori caratterizzati da bracci di massa ridotta ed elevata lunghezza, oppure nasce tutte le volte che si utilizzano sistemi di controllo con elevate velocità di risposta, dando origine ad accelerazioni considerevoli dell'organo terminale. I limiti alle prestazioni dei sistemi di controllo del moto dipendono anche dal posizionamento dei sensori utilizzati: infatti, se si dispone soltanto della misura della posizione del motore, come tipicamente accade nella

robotica industriale, non è possibile realizzare un posizionamento accurato del "carico" con un sistema di controllo arbitrariamente veloce, poiché una misura lato motore non permette di considerare eventuali effetti di elasticità presenti nella trasmissione o nel braccio. Per contro, quindi, questi limiti di prestazione possono essere superati introducendo una misura diretta della posizione del "carico", ovvero una misura della grandezza che permette di catturare le dinamiche effettivamente rilevanti per il sistema di controllo.

Il visual servoing, ovvero l'utilizzo della retroazione visiva per il controllo di posizione dell'organo terminale di un manipolatore, rappresenta quindi una possibile metodologia per introdurre una misura diretta della posizione che si desidera controllare, ovvero per superare i sopracitati limiti alle prestazioni dei sistemi di controllo del moto.

Si può quindi concludere che la presenza di flessibilità concentrata o distribuita nei manipolatori ed il visual servoing posso essere interpretati come due differenti aspetti dello stesso problema: dai limiti alle prestazioni che nascono nel progetto di sistemi per il controllo di posizione dei servomeccanismi, allorché si disponga soltanto della misura della posizione del motore, si evince la necessità di sviluppare nuove architetture di controllo in grado di sfruttare una misura diretta della posizione del "carico".

Il controllo dei manipolatori flessibili

Nel controllo delle strutture flessibili risulta particolarmente rilevante la scelta della "variabile controllata", la difficoltà del problema può infatti cambiare in modo significativo in base alle posizioni mutue di sensori e attuatori. In particolare, si considerano tradizionalmente due scenari contrastanti: quello in cui sensori e attuatori sono "colocati", corrispon-

L. Bascetta, Dipartim. di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano

dente al controllo di giunto, e quello in cui, al contrario, sono “non collocati”, corrispondente al controllo della posizione dell’organo terminale del manipolatore. Quando, infatti, l’applicazione richiede un posizionamento accurato dell’organo terminale, l’utilizzo del controllo di giunto, che agisce cercando di irrigidire una parte della struttura, dando origine a considerevoli vibrazioni nella parte rimanente, non rappresenta una soluzione praticabile.

D’altra parte, il controllo di traiettoria dell’organo terminale costituisce uno dei problemi più complicati che si incontrano nel controllo dei manipolatori flessibili. La relazione esistente fra le coppie motrici ai giunti e la posizione dell’organo terminale, un insieme di coppie sensori/attuatori non collocate, è caratterizzata da un comportamento “a fase non minima”: fornendo una coppia in senso orario ad un braccio flessibile la sua punta, nei primi istanti del moto, si sposterà in direzione opposta. Questa caratteristica, che nel caso dei sistemi lineari costituisce una limitazione alla banda ottenibile per il sistema ad anello chiuso, non permette di estendere al controllo dell’organo terminale le strategie di inversione non

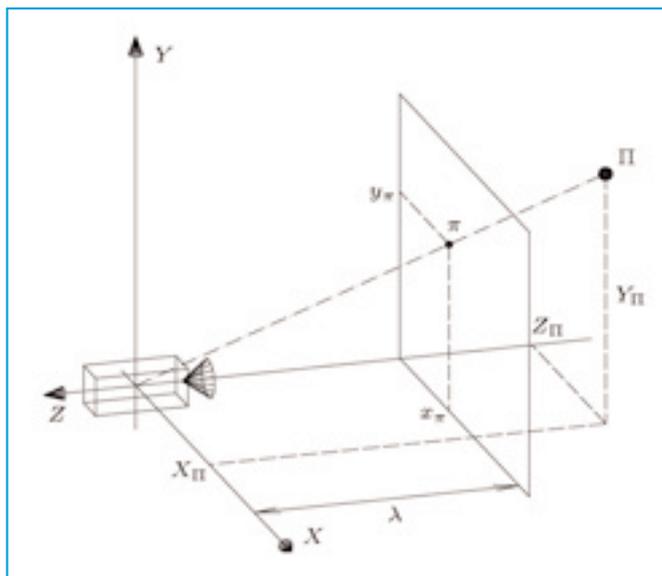


Figura 1 - Un semplice modello di telecamera

lineare utilizzate nel controllo a livello di giunto. Un approccio alternativo, che sfrutta la naturale suddivisione in due scale di tempo delle dinamiche di un manipolatore flessibile e, come si vedrà nel seguito, ben si adatta all’introduzione delle tecniche visual servoing, è stato sviluppato in [8] e [9], rispettivamente sulla base delle teorie delle perturbazioni singolari e degli integral manifold.

Il moto di un manipolatore flessibile può essere descritto come la sovrapposizione di due fenomeni distinti. Da una parte, infatti, esso può essere approssimato con la traiettoria di un manipolatore rigido dalle caratteristiche meccaniche equivalenti (il moto “medio” del robot), i cui bracci risultano staticamente deformati a causa delle inerzie meccaniche in gioco. Per ottenere poi il moto completo del manipolatore è necessario aggiungere le oscillazioni libere di ciascun braccio intorno a questa traiettoria di “quasi equilibrio”.

Si può, quindi, facilmente intuire che una struttura flessibile è caratterizzata da due dinamiche che evolvono su due scale di tempo distinte: il moto rigido, che costituisce la dinamica lenta del sistema, ed il moto vibratorio che ne rappresenta quella veloce. Le metodologie di controllo a due scale di tempo permettono, allora, di affrontare il problema dell’inseguimento di traiettoria dell’organo terminale mediante una filosofia di tipo “divide et impera”, operando così una riduzione della complessità del progetto.

Il sistema risultante sarà quindi costituito da due differenti controllori: il primo che smorza le oscillazioni della struttura, progettato considerando le sole dinamiche vibratorie del manipolatore, il secondo che presiede all’inseguimento della traiettoria desiderata, progettato sulla base del modello di un manipolatore rigido equivalente. Nel seguito dell’articolo verranno presentati due approcci di tipo visual servoing al progetto dei controllori appena descritti.

Un approccio visual servoing al controllo di traiettoria

Quando la precisione del posizionamento dell’organo terminale di un manipolatore risulta di particolare importanza, l’utilizzo di tecniche visual servoing può apportare significativi aumenti delle prestazioni del sistema. La misura diretta della posizione della punta del manipolatore fornita dalla telecamera, infatti, a differenza di quella indiretta stimata a partire da misure encoder ed estensimetriche, non risulta affetta dai tipici errori dovuti ad un’imprecisa conoscenza dei parametri meccanici del manipolatore (che risultano particolarmente evidenti nel caso in cui si debba considerare anche la flessibilità del materiale), permettendo quindi di migliorare significativamente l’accuratezza del posizionamento.

La telecamera viene usualmente descritta come una lente capace di proiettare su un piano bidimensionale, il piano immagine ove risiede l’elemento sensibile (Ccd), le immagini tridimensionali contenute nella scena.

Trascurando le dinamiche elettriche del sensore, la telecamera viene quindi modellizzata attraverso la proiezione prospettica operata dalla lente ([5]): dette X, Y, Z le coordinate di un punto Π espresse rispetto al sistema di riferimento della telecamera e $\xi = [x \ y]^T$ la proiezione di tale punto sul piano immagine (figura 1), vale la seguente relazione

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = -\alpha \frac{\lambda}{Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (1)$$

dove λ è la lunghezza focale della lente, α il fattore di conversione da metri a pixel. Si osservi ora che, note le coordinate di Π espresse nel sistema di riferimento assoluto e la cinematica diretta del manipolatore, si possono facilmente ricavare le coordinate di Π espresse nel sistema di riferimento della telecamera; la medesima relazione potrà poi essere applicata alle rispettive velocità. Sfruttando allora tali relazioni, e differenziando la (1) rispetto al tempo, si ottiene la seguente espressione

$$\ddot{\xi} = J(\mathbf{q}, \xi, Z) \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{v}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

dove \mathbf{q} e $\dot{\mathbf{q}}$ sono rispettivamente i vettori di posizione e velocità di giunto, $\dot{\mathbf{v}}$ è la velocità del punto considerato rispetto al sistema di riferimento assoluto e $J(\mathbf{q}, \xi, Z)$ prende il nome di *Jacobiano immagine*.

L'analogia tra lo Jacobiano immagine appena introdotto e lo Jacobiano analitico usualmente utilizzato nella robotica rigida suggerisce la possibilità di sviluppare una legge di controllo visual servoing ispirata al ben noto controllo a dinamica inversa nello spazio operativo [7].

Si ricordi, inoltre, che tale controllo opererà sulla "dinamica dominante" del sistema, ovvero sul modello di un manipolatore equivalente rigido. L'obiettivo di tale azione di controllo sarà quindi quello di garantire che il vettore ξ raggiunga, asintoticamente, il valore desiderato ξ_d , ovvero che l'errore $\tilde{\xi} = \xi_d - \xi$ sia nullo dopo un determinato intervallo di tempo. Il modello dinamico di un robot rigido costituito da n bracci può essere scritto nella ben nota forma ([7])

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + g(\mathbf{q}) = \mathbf{u}$$

dove M è la matrice d'inerzia, C il vettore delle coppie centrifughe e di Coriolis, g il vettore delle coppie di gravità e \mathbf{u} il vettore delle coppie motrici ai giunti. Se, a tale modello, si applica una legge di controllo della forma

$$\mathbf{u} = C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + g(\mathbf{q}) + M(\mathbf{q})\mathbf{v} \quad (3)$$

ovvero si provvede alla compensazione dei termini non lineari e della gravità, esso si riduce ad una catena di doppi integratori $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{v}$. Infine, la nuova variabile di controllo \mathbf{v} potrà essere utilizzata per imporre all'errore $\tilde{\xi}$ il comportamento

$$\mathbf{v} = J_R(\mathbf{q}, \xi, Z)^{-1} \left[K_D \dot{\tilde{\xi}} + K_P \tilde{\xi} - J_T(\mathbf{q}, \xi, Z) \dot{\mathbf{v}} - \mathbf{f}_R(\mathbf{q}, \mathbf{q}, \xi, \xi, Z, Z) \mathbf{q} - \mathbf{f}_T(\mathbf{q}, \mathbf{q}, \xi, \xi, Z, Z) \mathbf{v} \right] \quad (4)$$

desiderato. Si assuma, infatti, per \mathbf{v} la seguente espressione dove $J(\mathbf{q}, \xi, Z) = [J_R(\mathbf{q}, \xi, Z) \ J_T(\mathbf{q}, \xi, Z)]$, si può allora facilmente verificare che vale la seguente relazione

$$\ddot{\tilde{\xi}} + K_D \dot{\tilde{\xi}} + K_P \tilde{\xi} = 0 \quad (5)$$

dove K_P e K_D sono due matrici diagonali, definite positive, i cui elementi diagonali rappresentano rispettivamente la velocità di annullamento e lo smorzamento delle traiettorie degli errori $\tilde{\xi}$. Quanto precedentemente affermato si ricava facilmente osservando che, derivando la (2) rispetto al tempo si ottiene

$$\ddot{\xi} = J(\mathbf{q}, \xi, Z) \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{v}} \end{bmatrix} + \mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{q}, \xi, \xi, Z, Z) \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{v}} \end{bmatrix}$$

e ricordando il modello del manipolatore, dopo che la compensazione non lineare è stata applicata, segue

$$J_R(\mathbf{q}, \xi, Z) \mathbf{v} = \ddot{\xi} - J_T(\mathbf{q}, \xi, Z) \dot{\mathbf{v}} - \mathbf{f}_R(\mathbf{q}, \mathbf{q}, \xi, \xi, Z, Z) \mathbf{q} - \mathbf{f}_T(\mathbf{q}, \mathbf{q}, \xi, \xi, Z, Z) \mathbf{v}$$

da cui, sostituendo l'espressione di \mathbf{v} (4), si ottiene (5). In conclusione, il controllo visual servoing costituito da (3) e (4) garantisce l'inseguimento della traiettoria desiderata e le prestazioni di tale inseguimento possono essere scelte mediante gli elementi delle matrici K_P e K_D .

Sebbene quanto affermato sia corretto dal punto di vista teorico, l'espressione di \mathbf{v} potrebbe risultare computazionalmente onerosa per essere implementato in un sistema di controllo realtime. È allora possibile dimostrare [2] che il sistema controllato risulta stabile anche se a (4) si sostituisce la seguente espressione semplificata

$$\mathbf{v} = J_R(\mathbf{q}, \xi, Z)^{\#} \left[K_D \dot{\tilde{\xi}} + K_P \tilde{\xi} \right] \quad (6)$$

dove con il simbolo # in apice si è indicata la matrice pseudoinversa dello Jacobiano.

Un approccio visual servoing allo smorzamento delle vibrazioni

Il controllo delle vibrazioni di una struttura flessibile ha lo scopo di aumentare lo smorzamento strutturale del materiale, tipicamente troppo basso per garantire una rapida estinzione delle oscillazioni indotte dal moto del manipolatore. Di norma tale controllo è costruito a partire da misure di deformazione locale dei bracci ottenute mediante estensimetri.

Tali sensori, costituiti da un filamento metallico la cui resistenza varia in funzione della deformazione, sono semplici e poco costosi ma estremamente rumorosi, a causa delle interferenze elettromagnetiche (tipicamente causate dalla vicinanza dei cavi di potenza dei motori in cui scorrono correnti variabili ad alta frequenza). Al contrario, l'informazione visiva proveniente dalla telecamera non risulta corrotta da questo rumore e, in generale, mostra un rapporto segnale-rumore di

gran lunga più favorevole. D'altro canto, affinché il segnale della telecamera possa essere utilizzato per la ricostruzione delle vibrazioni della struttura è necessario che essa sia caratterizzata da una frequenza di acquisizione sufficientemente elevata. Sebbene le telecamere analogiche di uso industriale siano caratterizzate da una frequenza di semiquadro pari a 50/60 Hz, quindi troppo bassa per un simile utilizzo, sono attualmente disponibili, a livello prototipale, telecamere con frequenza di 1 kHz. È, infine, opportuno osservare che la misura estensimetrica non può essere direttamente utilizzata dal sistema di controllo è, infatti, necessario introdurre un ricostruttore dello stato per stimare lo "stato elastico" della struttura. Si comprende allora come sia vantaggioso sostituire il ricostruttore con un filtro di Kalman, capace di fondere le misure estensimetriche con quella visiva, assegnando a ciascuna un peso appropriato in funzione del rumore ad essa associato, al fine di migliorare la qualità della stima (e, di conseguenza, l'efficacia del sistema di smorzamento delle vibrazioni).

Caratteristiche meccaniche del manipolatore Slave

| | |
|-------------------------|---|
| Bracci | asta in alluminio a sezione rettangolare, lunghezza 0,4 m, altezza 0,04 m e spessore 0,005 m |
| Motore di spalla | massa 4,52 kg incluso il riduttore, inerzia di rotore $8 \cdot 10^{-6}$ kgm ² , inerzia di statore $3,6 \cdot 10^{-4}$ kgm ² , rapporto di trasmissione 200:1 |
| Motore di gomito | massa 0,94 kg incluso il riduttore, inerzia di rotore $2,35 \cdot 10^{-6}$ kgm ² , inerzia di statore $1,27 \cdot 10^{-4}$ kgm ² , rapporto di trasmissione 100:1 |

Alcuni risultati di simulazione

Si consideri un manipolatore planare (figura 2) costituito da due bracci flessibili e con una telecamera attaccata all'organo terminale (nel seguito tale manipolatore verrà indicato con il nome di Slave). Il manipolatore è composto da due bracci flessibili in alluminio, lunghi 0.4 m ciascuno (si veda la tabella per ulteriori dettagli).

La telecamera è caratterizzata da una lunghezza focale λ di 8 mm ed un fattore di scala medio pari a 100 pixel/mm. Il target è costituito da due punti, posti agli estremi di un segmento di 12 cm di lunghezza, ed è fissato all'organo terminale di un manipolatore rigido a due bracci, avente le stesse caratteristiche meccaniche dello Slave (nel seguito tale manipolatore verrà indicato con il nome di Master). I manipolatori Master e Slave si muovono su due piani paralleli posti alla distanza di 80 cm. Nel seguito è stata considerata la legge di controllo semplificata (3), (6). K_P e K_D sono stati scelti in modo da assicurare la separazione in scale di tempo tra i sottosistemi lento e veloce anche in anello chiuso.

Poichè la più piccola frequenza naturale associata alle vibrazioni della struttura è pari a circa 9 Hz, si è scelta una banda per il controllore visual servoing pari a circa 1 Hz. Il sistema che presiede allo smorzamento delle vibrazioni è, invece, basato su un filtro di Kalman che fonde le misure provenienti da quattro coppie di estensimetri, due per ogni braccio, con l'informazione visiva della telecamera. Tale filtro è stato progettato in modo da utilizzare, nella ricostruzione dello stato di deformazione della struttura, maggiormente l'informazione proveniente dalla telecamera, meno rumorosa rispetto a quelle estensimetriche.

Nelle figure 3 e 4 sono mostrate due simulazioni riguardanti la ricostruzione delle variabili che descrivono lo stato elastico della struttura, ovvero quelle su cui si costruisce il controllo per lo smorzamento delle vibrazioni, ottenute me-

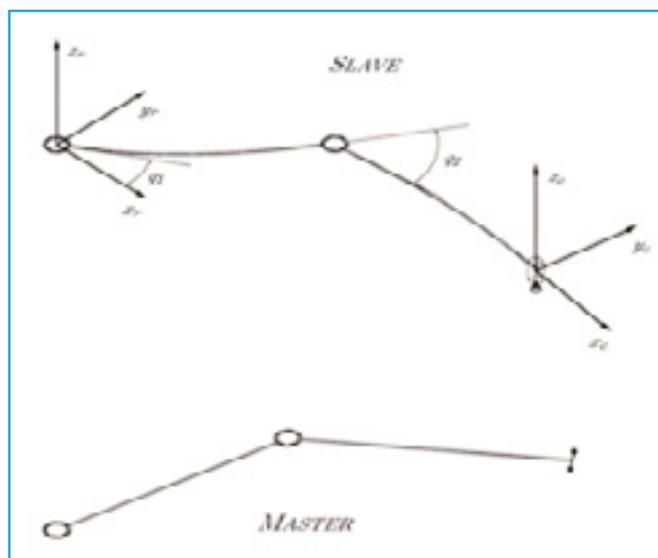


Figura 2 - I manipolatori Master e Slave

dante un filtro di Kalman alimentato soltanto con le misure estensimetriche (figura 3) oppure con le misure estensimetriche e il segnale visivo (figura 4). Risulta quindi evidente che l'aggiunta dell'informazione proveniente dalla telecamera, caratterizzata da un rapporto segnale-rumore più favorevole, permette di migliorare significativamente la qualità della stima. Nelle figure 5 e 6 si possono, invece, osservare i risultati di una simulazione concernente l'inseguimento di un target in moto, in cui sono attivi sia l'inseguimento di traiettoria

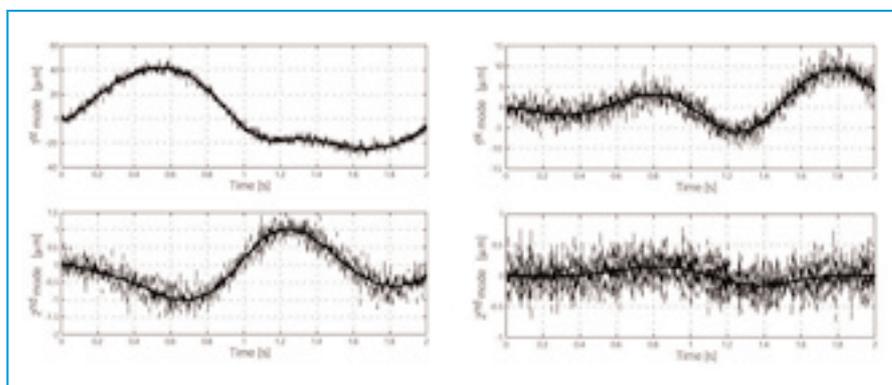


Figura 3 - Stima delle coordinate elastiche da misure estensimetriche

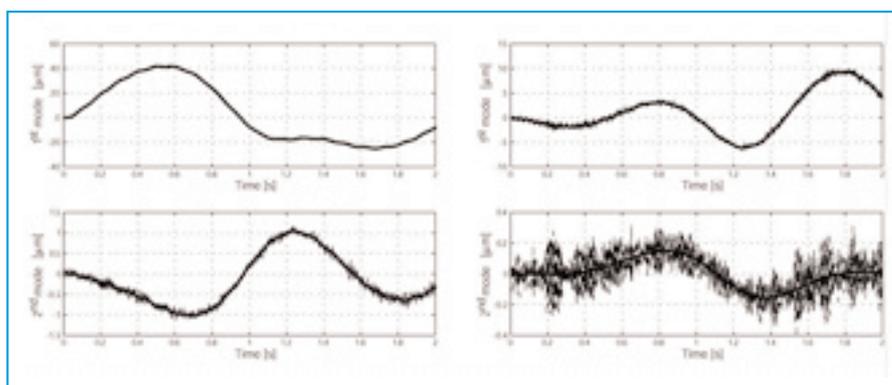


Figura 4 - Stima delle coordinate elastiche da misure estensimetriche e visive

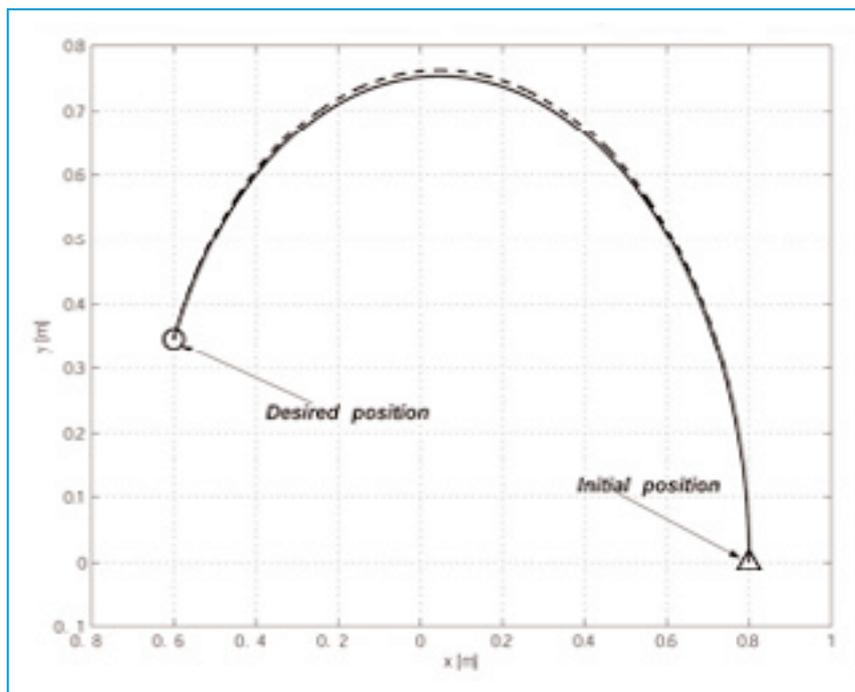


Figura 5 - Traiettoria della telecamera (linea continua) e del Master (linea tratteggiata)

che lo smorzamento delle vibrazioni basati su controllore visual servoing. In questo caso si osserva che, sebbene le misure estensimetriche siano affette da elevato rumore, il sistema controllato mostra risultati soddisfacenti sia nell'inseguimento del target che nello smorzamento delle vibrazioni.

Conclusioni

In questo lavoro è stata presentata una metodologia che permette di applicare tecniche visual servoing al problema del controllo di traiettoria di manipolatori flessibili. In particolare, è stato analizzato l'incremento di prestazione ottenibile allorché il sistema di controllo disponga non solo delle misure standard di posizione e deformazione dei bracci, ma anche di una misura visiva fornita da una telecamera montata sull'organo terminale. La tecnica adottata per risolvere il problema del controllo del moto del manipolatore permette

di affrontare separatamente i problemi di controllo di traiettoria e di smorzamento delle vibrazioni. In entrambi i casi è stata proposta una soluzione basata su controllori di tipo visual servoing. Come si osserva dalle simulazioni presentate, la scelta di aggiungere alle misure classiche la retroazione dell'informazione visiva comporta un significativo aumento delle prestazioni, in particolare nello smorzamento delle vibrazioni ove i sensori classici sono affetti da elevato rumore. Il lavoro presentato è stato parzialmente supportato dall'Agenzia Spaziale Italiana in quanto parte del progetto di ricerca nazionale "Esperimento multiobiettivo imbarcato per ricerche innovative nei settori di robotica, sistemi di controllo e comportamento dei materiali".

Bibliografia

- [1] K.J. Åström, "Limitations in control system performance", *European Journal of Control*, Vol. 6, N. 20, 2000, pp. 2-26.
- [2] L. Bascetta, *Visual servoing of flexible manipulators*, Tesi di Dottorato, Politecnico di Milano, 2004.
- [3] G. Ferretti, G. Magnani, P. Rocco, "Alternatives in precise load motion control of two mass servomechanism", *Ieee/Asme International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Como 2001, pp. 893-898.
- [4] G. Ferretti, G. Magnani, P. Rocco, "Limitations in control of elastic servos with co-located sensors", *7th International Workshop on Advanced Motion Control*, 2002, pp. 92-07.
- [5] S.A. Hutchinson, G.D. Hager, P.I. Corke, "A tutorial on visual servo control", *Ieee Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, N. 5, 1996, pp. 651-670.
- [6] R. Middleton, H.J.K. Ward, J.S. Freudenberg, A.R. Woodyatt, "Performance limitations in a class of resonant systems", *38th International Conference on Decision and Control*, 1999.
- [7] L. Sciavicco, B. Siciliano, *Robotica industriale: modellistica e controllo di robot manipolatori*, 2° edizione, McGraw Hill, 2000.
- [8] B. Siciliano, W.J. Book, "A singular perturbation approach to control of lightweight flexible manipulators", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 7, 1988, pp. 79-90.
- [9] B. Siciliano, W.J. Book, G. De Maria, "An integral manifold approach to control of a one link flexible arm", *Ieee Conference on Decision and Control*, 1986, pp. 1131-1134. ■

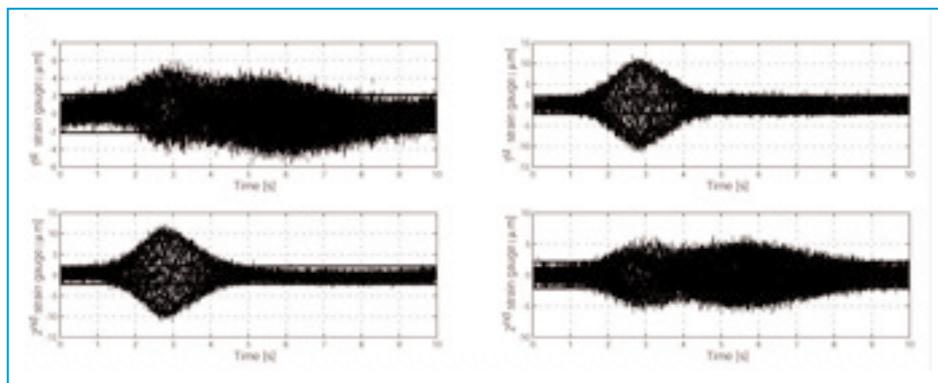


Figura 6 - Segnale estensimetrico durante il controllo di traiettoria (le linee continue rappresentano i livelli di rumore)