

Resoconto scientifico finale relativo al contratto di ricerca

ASI-ARS 99-38

Titolo Progetto Coordinato

Strutture ottimizzate e controlli intelligenti per manipolatori spaziali con bracci flessibili

Sedi Coordinate

Dipartimento di Automatica e Informatica – Politecnico di Torino (DAUIN-TO)

Dipartimento di Elettronica – Politecnico di Torino (DELEN-TO)

Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino (DIMEC-TO)

Dipartimento di Informatica e Automazione – Università degli Studi Roma Tre (DIA-RO3)

Responsabile scientifico e coordinatore

Prof. Basilio Bona

1 Introduzione generale

1.1 Riassunto in Italiano

Il contratto di ricerca ASI-ARS 99-38 è relativo al terzo ed ultimo anno di un progetto coordinato, avente come obiettivo la realizzazione di un prototipo di braccio flessibile, attuato al giunto ed integrato con un'architettura di controllo intelligente, atto a studiare le diverse problematiche inerenti il controllo di robot a struttura leggera. Gli studi compiuti hanno riguardato sia gli aspetti meccanici e controllistici, con particolare attenzione al controllo dell'interazione con altri corpi o bracci, sia il progetto e la realizzazione dell'elettronica di controllo, sia infine la costruzione di un simulatore completo dell'impianto. Sono state studiate inoltre tecniche grafiche per la simulazione a 3D in ausilio ad un operatore, in previsione di un successivo controllo a distanza del braccio (teleoperazione).

È stato assemblato il prototipo del braccio, per il quale è stato sviluppato un simulatore completo in ambiente Simulink (principalmente a cura di DAUIN-TO e DIMEC-TO). Il prototipo è stato realizzato in modo da poter facilmente sostituire la trave flessibile costituente il braccio e/o variare il carico in punta (eventualmente aggiungendo un secondo braccio, corredato del suo attuatore). Sono stati quindi studiati contemporaneamente (a cura di DIMEC-TO) smorzatori dinamici elettromagnetici da applicare in alternativa ai trasduttori piezoelettrici attualmente in uso; per confrontarne l'efficacia, prima dell'impiego sul braccio flessibile, è stato costruito un dimostratore *ad hoc*.

Dal punto di vista del controllo, sono stati studiati e provati (per ora solo in simulazione), differenti schemi di controllo del braccio flessibile basati su approcci LQG, LTR e H_∞ , a cura principalmente del gruppo DAUIN-TO, mentre sono proseguiti, in collaborazione con DIA-RO3, già avviati studi sul controllo dell'impatto, utilizzando un prototipo disponibile presso i laboratori dell'Università di Roma Tre.

L'unità di DELEN-TO ha provveduto alla definizione delle specifiche di un ambiente di alto livello per il co-progetto di sistemi di controllo, basando l'ambiente di progetto su programmi molto conosciuti quali Matlab/Simulink e su linguaggi di descrizione dell'hardware quali il VHDL. È stato inoltre progettato un sistema di controllo *general-purpose* basato su un DSP commerciale e su logiche programmabili.

L'unità di DIA-RO3 ha infine realizzato un primo prototipo di simulatore a grafica 3D di ausilio all'operatore per il controllo a distanza, utilizzando la rete Internet.

Nel seguito del documento è riportata una descrizione più dettagliata dell'attività di ricerca svolta, a cura delle singole unità che si sono principalmente occupate dei vari aspetti.

1.2 Abstract in English

The ASI-ARS 99-38 contract is relative to the third and last year of a coordinate research project, whose goal is the construction of a flexible robot arm prototype, equipped by a motor and integrated with an intelligent control architecture, to study the various matters related to flexible robots control. The carried out research dealt with both the mechanical and control aspects, with the design and implementation of the control electronics, and finally with the

development of a complete simulator of the plant. Graphical techniques have been studied also for 3D simulation, to be used as an aid to the operator for a subsequent remote control (teleoperation) of the robot arm.

The flexible link prototype has been assembled, and a complete simulator has been developed in the Simulink environment (mainly by the DAUIN-TO and DIMEC-TO groups). An easy substitution of the flexible beam and/or the addition of a payload (possibly a second link, with its actuator) are allowed by construction. Electromagnetic proof mass dampers have then been studied and constructed by the DIMEC-TO group, to be alternatively used instead of the piezoelectric transducers currently employed. A devoted test rig has been constructed, to test their effectiveness before using them in the flexible link prototype.

From the control point of view, the DAUIN-TO group has studied different schemes for the control of the flexible link, by following the LQG, LTR and H_∞ approaches, and tested them (even if presently only by simulation); previous studies about impact control have been extended and completed in collaboration with the DIA-RO3 group, also experimentally by using a test-bed that is available in the laboratories of *Università di Roma Tre*.

The DELEN-TO group has provided detailed specifications of a high-level co-design environment for programmable control systems, by using well-known languages both for the design environment, such as Matlab/Simulink, and for the hardware description, as VHDL. A detailed project of a DSP/PLD based control system has also been developed.

The DIA-RO3 unit has finally developed a 3D graphical simulator, to be used as an aid to the operator for the remote control of the manipulator, by employing the Internet network for the data transmission.

In the remainder of this document, a detailed description of the research activity is provided by the single units that mainly dealt with the various aspects.

2 Attività dell'Unità di ricerca DAUIN-TO

2.1 Riassunto in Italiano

L'attività di ricerca dell'unità del Dipartimento di Automatica e Informatica del Politecnico di Torino, nell'ambito del contratto ASI ARS-99-38, ha riguardato principalmente i seguenti temi:

1. Sviluppo di un modello dinamico completo del prototipo di braccio flessibile, dotato di attuatori concentrati e distribuiti (realizzato in collaborazione con l'unità del DIMEC-TO ed il Centro Servizi di Prototipazione del Politecnico di Torino) e realizzazione in ambiente Simulink del relativo simulatore.
2. Studio e progetto di algoritmi di controllo per bracci flessibili, secondo differenti approcci (nel tempo ed in frequenza).
3. Studio ed implementazione sperimentale di algoritmi per il controllo dell'impatto di bracci, considerati in prima approssimazione rigidi, ed analisi dell'influenza dell'effettiva elasticità della struttura (in collaborazione con l'unità del DIA-RO3).
4. Sviluppo di una scheda di interfaccia tra il sistema OpenDSP e l'azionamento del prototipo di braccio flessibile realizzato; sviluppo e realizzazione di un software per il collaudo e la messa in opera del sistema di controllo.

2.2 Abstract in English

The research activity of the DAUIN-TO group, under the ASI ARS-99-38 grant, has been mainly devoted to the following topics:

1. Development of a complete dynamic model for the experimental set up of a flexible robot link, equipped by concentrated and distributed actuators (together with the DIMEC-TO research unit, in cooperation with *Centro Servizi di Prototipazione of Politecnico di Torino*).
2. Study and design of control schemes for flexible robot links, according to different approaches (in the time domain and in the frequency one).
3. Study and experimental implementation of schemes for the impact control of links, that are approximately considered as rigid, and evaluation of the influence of the actual structure elasticity (in cooperation with the DIA-RO3 research unit).
4. Development of HW and SW interfaces between the OpenDSP environment and the joint actuator of the flexible link prototype, for the implementation of the control architecture.

2.3 Descrizione della Ricerca

L'attività di ricerca è stata principalmente orientata al completamento del modello dinamico del prototipo di braccio flessibile allestito in collaborazione con l'unità del DIMEC-TO ed il Centro Servizi di Prototipazione del Politecnico di Torino, nonché alla costruzione del relativo simulatore in ambiente Simulink. In particolare, nella formulazione del modello, e quindi nella definizione dei blocchi del simulatore, sono state considerate le diverse possibili configurazioni di lavoro del braccio, relativamente all'utilizzo o meno dei dispositivi piezoelettrici, come sensori oppure anche come attuatori, al fine di poter facilmente valutare l'effettiva efficacia del loro impiego.

Sulla base di tale modello sono stati sviluppati differenti schemi di controllo, alcuni secondo metodi LQG e LTR, con l'inserimento di un osservatore per la ricostruzione degli stati del sistema, altri definiti nel dominio della frequenza secondo tecniche di tipo H_∞ . Le prime prove effettuate in simulazione hanno mostrato l'effettiva validità della stima della deflessione della punta del braccio, ottenuta a partire dalle misure di deformazione strutturale fornite dai piezoelettrici impiegati come sensori. Maggiori dettagli sui risultati ottenuti sono contenuti in alcuni rapporti interni ed in lavori di tesi.

Per ultimare la messa in opera del prototipo sperimentale, è stata sviluppata una scheda di interfaccia (e relativa logica di controllo) tra il sistema OpenDSP e l'azionamento del motore brushless al giunto, per l'applicazione di comandi al driver del motore e per la lettura dei segnali dell'encoder.

In collaborazione con l'unità di ricerca dell'Università di Roma Tre, è proseguito lo studio di algoritmi di controllo dell'impatto di bracci robotici con l'ambiente esterno. In particolare, sono stati implementati alcuni algoritmi ad un prototipo di braccio (disponibile presso l'Università di Roma Tre), considerato completamente rigido in prima approssimazione, ed è stata analizzata l'influenza dell'effettiva elasticità della struttura sul controllo dell'urto contro un corpo rigido.

Publicazioni

- M. Indri, A. Tornambè, "Robust Control of a Simple Mechanical System Subject to Impacts", *3rd IFAC Symposium on Robust Control Design (ROCOND '2000)*, Praga, CZ, Giugno 2000. (*)
- M. Indri, A. Tornambè, "Design of an Output Feedback Control Law for a Mechanical System Subject to Impacts: Output Regulation and Impact Insensitivity", *2nd International Symposium on Impact and Friction of Solids, Structures and Machines*, Montreal, Canada, 8-12 Agosto 2000. (*)
- M. Indri, A. Tornambè, "Impact Control of a Single-Link Robot Striking Different Environments: Theoretical and Experimental Investigation", *European Journal of Control*, vol. 6, n. 4, pagg. 322-337, 2000. (*)
- M. Indri, A. Tornambè, "On the Design of a Position Feedback Control Law for a Simple Mechanical System Subject to Impacts", *International Journal of Control*, vol. 74, n.8, 857-872, 2001. (*)
- B. Bona, M. Indri, N. Smaldone, "Open System Real Time Architecture and Software Design for Robot Control", *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM01)*, pagg. 349-354, 2001.

(*) Pubblicazione di autori appartenenti a differenti unità del progetto di ricerca.

3 Attività dell'Unità di ricerca DELEN-TO

3.1 Riassunto in Italiano

Il lavoro relativo ai primi sei mesi del terzo anno di progetto è stato focalizzato su due punti principali:

- definizione delle specifiche di un ambiente di alto livello per il co-progetto di sistemi di controllo
- progetto di un sistema di controllo general-purpose basato su un DSP commerciale e su logiche programmabili.

Riguardo il primo punto della ricerca, si è proceduto alla stesura delle specifiche di un ambiente di progetto di alto livello per sistemi di controllo basati su risorse programmabili hardware e software. Questa scelta è stata fatta in concomitanza con il progetto di un sistema di controllo general-purpose basato su logiche programmabili (PLD) e su DSP commerciali: questa piattaforma permette, infatti, maggior flessibilità rispetto ai sistemi basati su dispositivi VLSI custom (progetto originario) per quel che riguarda la "mappatura" degli algoritmi di controllo classici e neuro-fuzzy.

La scheda DSP/PLD progettata, permette anche il test di dispositivi integrati VLSI con sufficiente accuratezza in quanto è possibile implementare sulle logiche programmabili le stesse architetture di controllo realizzate su dispositivi VLSI

custom. Ovviamente questo approccio richiede lo sviluppo del progetto dei chip dedicati a partire da linguaggi di alto livello (quali il VHDL) utilizzabili anche per la sintesi automatica di dispositivi VLSI.

3.2 Abstract in English

The work carried on was essentially based on two main points:

- detailed specifications of a high-level co-design environment for programmable control systems
- detailed project of a DSP/PLD based control system

About the first point, we developed the specifications of a high-level design environment for hardware/software programmable platforms. This choice was made concurrently with the design of a general purpose control system based on programmable logic devices (PLD) and commercial DSPs: this platform allows more flexibility than others (based on custom VLSI devices, original project) when used to implement programmable control architectures (classic and neuro-fuzzy).

The DSP/PLD board can also be used to test VLSI devices with good accuracy: in fact it is possible to download on programmable devices the same control architectures implemented on custom VLSI chips. This approach requires high level description tools and languages (VHDL for example) also for VLSI chip synthesis.

3.3 Descrizione della Ricerca

Il lavoro di ricerca svolto nel terzo anno di progetto e' stato focalizzato su due punti principali:

- definizione delle specifiche di un ambiente di alto livello per il co-progetto di sistemi di controllo. Si è scelto di basare tutto l'ambiente di progetto su programmi molto conosciuti quali Matlab/Simulink e su linguaggi di descrizione dell'hardware quali il VHDL. Questo per concentrare tutte le risorse sulle potenzialità di co-progetto di questo ambiente. L'obiettivo principale è quello di ottenere un sistema in grado di sfruttare al meglio le risorse hardware e software delle piattaforme utilizzate effettuando un partizionamento delle architetture di controllo in base alle prestazioni che si vogliono ottenere dal sistema stesso. Nel corso dei prossimi sei mesi verrà proseguito il lavoro fino ad arrivare ad un flusso completo di progetto
- progetto di un sistema di controllo general-purpose basato su un DSP commerciale e su logiche programmabili. La novità di questa piattaforma rispetto a quelle realizzate nel corso delle precedenti ricerche, riguarda la possibilità di riconfigurazione dinamica dei dispositivi logici programmabili (PLD). La scheda può memorizzare differenti configurazioni ed effettuare automaticamente il download di una di esse a seconda dei dati provenienti dal DSP che funge da host di sistema. L'architettura e' stata anche pensata in funzione di architetture di controllo adattative, neurali e fuzzy: a bordo scheda esistono due logiche programmabili a disposizione dell'utente (PLD USER A e PLD USER B) dove sarà possibile implementare sia il sistema di controllo di riferimento sia il sistema adattativo in fase di apprendimento. Lo scambio tra i due sistemi di controllo in determinate condizioni, è assicurato da una terza logica programmabile (INTERCONNECTION PLD) che garantisce tempi di commutazione compatibili con le frequenze critiche del sistema controllato. Questa architettura garantisce anche lo scambio tra differenti configurazioni hardware senza dover fermare il sistema per la riconfigurazione delle logiche programmabili, operazione che richiederebbe tempi troppo lunghi e quindi criticità del sistema di controllo. La scheda si interfaccia per la parte di DSP con una Evaluation Board commerciale basata su di un DSP Texas TMS320LF2407.

Pubblicazioni

- M. Chiaberge, W. Santero, D. Amerio, Digital Solutions for reProgrammability, SCI'2001, The Fifth Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, USA, July 22 - 25, 2001.
- M. Chiaberge, N. Amati, G. Genta, An Adaptive Walking Machine for Planetary Explorations, Autonomous Minirobots for Research and Edutainment Conference, AMiRE 2001, Paderborn, Germany, October 22-25, 2001 (*)
- L.M. Reyneri, M. Chiaberge, L. Lavagno, B. Pino, E. Miranda, Simulink based HW/SW codesign of embedded Neuro-Fuzzy systems, International Journal of Neural Systems, Vol. 10, No. 3 (June, 2000), pp. 211-226.
- S. Carabelli, M. Chiaberge, E. Miranda, A. Argondizza, A. Delmastro, Rapid Control Engineering for Industrial Applications, IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, Sept. 2000 (*)
- N. Amati, M. Chiaberge, G. Genta, E. Miranda, L. Reyneri, WALKIE6: a walking rover demonstrator for planetary exploration, Clawar Newsletter, Issue 5, August 2000. (*)

(*) Pubblicazione di autori appartenenti a differenti unità del progetto di ricerca.

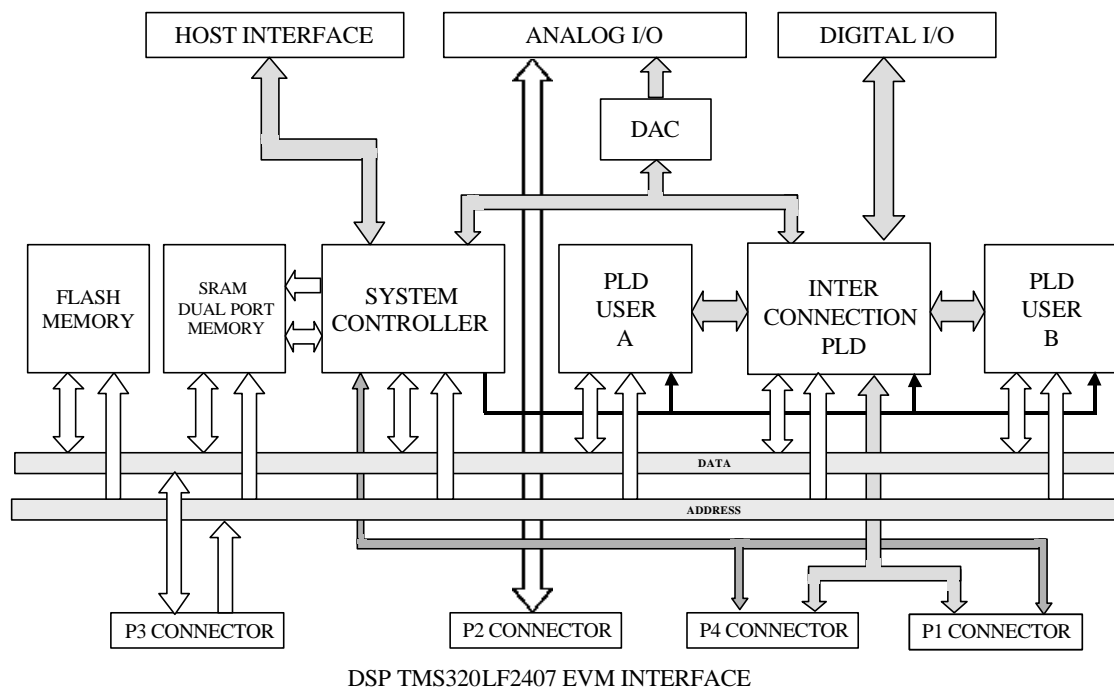


Figura 1: schema a blocchi della sistema di riconfigurazione dinamica delle logiche programmabili

4 Attività dell'Unità di ricerca DIMEC-TO

4.1 Riassunto in Italiano

I principali temi di ricerca sviluppati nell'ambito del contratto ASI n. ARS-99-38 all'interno del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino, nel corso del primo semestre riguardano:

- Modellistica ad elementi finiti di bracci flessibili che comprendono "active constrained layer dampers".
- Sviluppo di metodologie per la riduzione modale e per la modellazione delle azioni centrifughe e di Coriolis agenti sul braccio in rotazione.
- Progetto e realizzazione di smorzatori dinamici elettromagnetici da applicare in alternativa ai trasduttori piezoelettrici.
- Progetto e realizzazione di un dimostratore formato da travi dotate di trasduttori piezoelettrici e/o di smorzatori dinamici elettromagnetici al fine di confrontarne l'efficacia.

Nel corso del secondo semestre l'attività di ricerca si è rivolta a

- Confronto fra le prestazioni ottenibili con sistemi di controllo delle vibrazioni basati su trasduttori piezoelettrici e su smorzatori dinamici a correnti parassite
- Sviluppo di sistemi di controllo delle vibrazioni basati sull'uso di trasduttori elettromagnetici connessi a circuiti elettronici passivi e/o attivi.
- Progetto di un giunto motorizzato da installare all'estremità del banco sviluppato durante il precedente contratto

4.2 Abstract in English

The main research themes developed by Dipartimento di Meccanica of Politecnico di Torino during the first semester of the contract ASI n. ARS-99-38 concern the following subjects:

- Finite elements models of flexible links equipped with "active constrained layer dampers" (ACLD).
- Modal reduction techniques and integration of the centrifugal and Coriolis effects acting on the rotating arm into its FEM model.

- Design and construction of electromagnetic proof mass dampers.
- Design and construction of a test rig including a clamped beam of modular configuration with piezoelectric transducers and electromagnetic proof mass damper.

During the second semester the research activity has concerned the following aspects

- Comparison between the performances that can be achieved by vibration damping systems based on piezoelectric transducers and on eddy current dynamic dampers.
- Development of vibration damping systems based on the use of voice coil magnetic actuators shunted by means of passive and active electrical impedances.
- Design of a motorized joint to be installed on the test bench built during a previous ASI research contract.

4.3 Descrizione della Ricerca

4.3.1 Modellistica ad elementi finiti di bracci flessibili con “active constrained layer dampers”

L'applicazione di strati di materiale viscoelastico applicato da un lato ad una struttura vibrante e limitato nelle sue deformazioni tramite un opportuno strato rigido costituisce un metodo assai efficace per lo smorzamento delle vibrazioni. Tale metodo (“constrained layer damper” CLD) è noto da tempo e trova significative applicazioni industriali per il controllo passivo delle vibrazioni e l'attenuazione del rumore. Il principio fisico di funzionamento si basa sul fatto che il materiale viscoelastico compreso fra la struttura ed uno strato rigido (“constraining layer”) si trova soggetto a deformazioni prevalenti di taglio le quali danno luogo ad un'efficace dissipazione di energia di deformazione.

A causa della dipendenza delle proprietà dissipative dei materiali viscoelastici dalla frequenza, l'efficacia dei “constrained layer dampers” migliora con la frequenza. Essi sono quindi di efficacia limitata nel caso di frequenze di utilizzo modeste.

Al fine di migliorare le prestazioni a bassa frequenza è possibile sostituire lo strato rigido (“constraining layer”) con un trasduttore piezoceramico pilotato in retroazione da un segnale proporzionale alla deformazione locale della struttura. In questo modo la deformazione del piezoceramico aumenta la deformazione subita dal viscoelastico, aumentando l'energia in esso dissipata. Il metodo è noto in letteratura come “active constrained layer damper” (ACLAD), esso consente di ottenere smorzamenti elevati senza richiedere complesse leggi di controllo. Le capacità di smorzamento intrinseche del viscoelastico rendono efficace il dispositivo anche nel caso di guasto del sistema di controllo, rendendo il sistema intrinsecamente più sicuro rispetto a configurazioni in cui i piezoelettrici siano collegati rigidamente alla struttura.

Le basse frequenze di risonanza e le elevate deformazioni cui può essere soggetto il prototipo di braccio flessibile progettato e costruito nel corso del contratto ASI n. ARS-98-166 rendono l'uso di ACLAD assai promettente. Al fine di progettare un prototipo di braccio dotato di ACLAD, è stato sviluppato un elemento finito trave comprendente 5 strati (Figura 1 a sinistra). L'elemento è dotato di 4 nodi meccanici e di 2 nodi elettrici. I gradi di libertà dei nodi Nm1, Nm2 permettono di descrivere il comportamento assiale e flessionale della struttura di base. I gradi di libertà dei nodi Nm3, Nm4 tengono conto del comportamento assiale del piezoelettrico connesso alla struttura tramite il viscoelastico (constrained layer). I nodi elettrici Ne1, Ne2 permettono di descrivere il comportamento elettrico dei due strati piezoelettrici e l'accoppiamento elettromeccanico che in essi si verifica. Il numero di gradi di libertà complessivo dell'elemento è pari a 10.

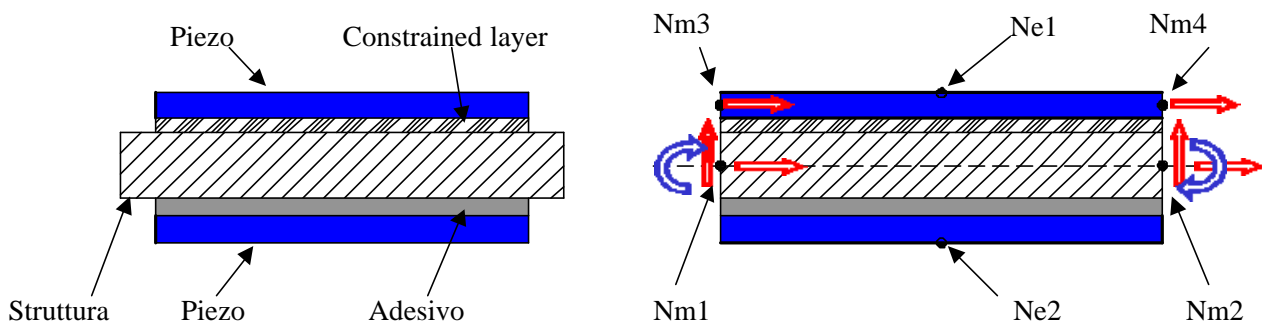


Figura 1 : schema dell'elemento finito trave con ACLD

Le matrici di massa, di rigidità e di accoppiamento elettromeccanico dell'elemento sono state ricavate mediante un approccio Lagrangiano. Il comportamento elastico e smorzante del viscoelastico è stato descritto tramite un modulo elastico complesso.

L'elemento è stato sviluppato in ambiente Matlab. Gli elementi sono stati poi assemblati in modo da realizzare un modello del braccio robotico flessibile completo di massa di estremità

4.3.2 Riduzione modale ed effetti centrifughi e di Coriolis

La presenza sulla superficie del braccio robotico flessibile di trasduttori, masse di estremità ed, eventualmente di un secondo giunto fa sì che il modello ad elementi finiti possa avere dimensioni notevoli. Al fine di permettere lo sviluppo di uno strumento di simulazione che permetta la sintesi degli algoritmi di controllo e la loro verifica è necessario ridurre le dimensioni del modello ad elementi finiti del braccio. L'ordine del modello ridotto deve poter essere selezionato. Durante la progettazione dell'algoritmo di controllo viene richiesto un modello che tenga conto solamente delle dinamiche da controllare. In fase di verifica delle prestazioni del controllore progettato è necessario un modello che tenga conto anche delle dinamiche non controllate che possono dare luogo a fenomeni di instabilità (spillover).

Nonostante le velocità di rotazione modeste del braccio progettato durante il contratto ASI n. ARS-98-166, la presenza di masse di estremità considerevoli e la notevole deformabilità del braccio fanno sì che il modello debba tenere conto degli effetti di irrigidimento centrifugo e di Coriolis.

La metodologia messa a punto consente di tenere conto delle azioni di Coriolis a partire dal modello ad elementi finiti già assemblato. Il modello ridotto è dotato di gradi di libertà corrispondenti alla rotazione di corpo rigido e di un numero di deformate modali definibili a seconda delle esigenze.

4.3.3 Smorzatori dinamici elettromagnetici

La disponibilità di magneti permanenti con densità di energia assai elevata ha reso possibile un incremento considerevole della densità di potenza ottenibile da macchine elettriche. Particolarmente promettente risulta l'applicazione di tali tecnologie nel campo del controllo strutturale. Una delle possibilità in tal senso è data dallo sviluppo di trasduttori elettromagnetici basati su un circuito magnetico induttore a magneti permanenti e su un indotto in materiale diamagnetico (Figura 1). Nel caso più semplice l'indotto è costituito da un elemento conduttore (rame o alluminio) che si muove all'interno del campo magnetico generato dall'induttore. Si vengono così a generare delle correnti parassite che permettono di generare un effetto di smorzamento viscoso. Nel caso in cui l'indotto sia costituito da una bobina, la connessione della bobina ad una dinamica elettrica permette di dimensionare l'intervallo di frequenze in cui il dispositivo è efficace come smorzatore.

L'attività di ricerca si è rivolta all'integrazione di trasduttori elettromagnetici all'interno di smorzatori dinamici costituiti da una massa sostenuta da una molla. La variabilità dei parametri del circuito elettrico connesso al trasduttore consente di sintonizzare la frequenza e lo smorzamento dello smorzatore dinamico. Il fatto che le azioni dissipative siano concentrate nella parte elettrica del dispositivo permette di minimizzare le caratteristiche dissipative della molla. I fenomeni legati a attrito e non linearità risultano in questo modo minimizzati.

L'assenza di non linearità e isteresi rende questo tipo di dispositivi promettente in strutture flessibili per applicazioni in cui è richiesta precisione di posizionamento.

La ricerca si è svolta secondo i seguenti punti:

- analisi parametrica per determinare il dimensionamento del trasduttore elettromagnetico ottimo dal punto di vista della densità di forza sviluppata.
- Validazione tramite modelli ad elementi finiti del campo magnetico dell'approccio analitico impiegato in fase di simulazione
- Dimensionamento di uno smorzatore dinamico a correnti parassite da installare su un dimostratore di braccio flessibile.

4.3.4 Progetto e realizzazione di un dimostratore con smorzatore dinamico elettromagnetico

Un dimostratore per la prova di travi flessibili dotate di sistemi di controllo delle vibrazioni è stato progettato e costruito (Figura 2). Al fine di effettuare un facile confronto fra configurazioni diverse, il progetto è basato su criteri di modularità e si basa su travi che comprendono:

- elementi di interfaccia meccanica (incastro di estremità) integrati nella trave
- connessioni elettriche ai trasduttori su di essa installati

Attualmente il banco è completo di:

- basamento,

- sensore di spostamento per la misura delle deflessioni delle travi
- travi flessibili complete di elementi di interfaccia meccanica.

Le Figure 3 e 4 illustrano il prototipo di smorzatore dinamico a correnti parassite che è stato progettato e costruito. Esso è costituito da un induttore in materiale conduttore (rame) solidale all'estremità libera della trave da smorzare. Il circuito magnetico (indotto) è solidale con la massa mobile dello smorzatore dinamico la quale a sua volta è connessa tramite molle di flessione all'estremità della trave. Lo smorzatore è sintonizzato sulla prima frequenza propria della trave.

Al fine di valutare l'efficacia della soluzione basata su smorzatore a correnti parassite rispetto ad altri metodi di smorzamento delle vibrazioni il banco prova comprende una serie di travi dotate di di trasduttori piezoelettrici connessi rigidamente e/o tramite strato viscoelastico.

In Figura 5 è riportato il confronto fra le prestazioni dinamiche ottenute con lo smorzatore a correnti parassite e quelle ottenute con un sistema di controllo attivo basato su trasduttori piezoelettrici. Si osserva come le prestazioni raggiunte dai due sistemi siano paragonabili. Il vantaggio dello smorzatore dinamico risulta la maggiore semplicità e minori costi, per contro esso è adatto allo smorzamento di un singolo modo di vibrare.

4.3.5 Controllo delle vibrazioni basato su trasduttori connessi a impedenze attive/passive

Con rif alla Figura 4, la sostituzione dell'induttore in materiale conduttore continuo con un induttore avvolto permette di trasformare il dispositivo in un attuatore magnetico a bobina mobile. Tramite la connessione della bobina a impedenze elettriche opportune è possibile modificare il comportamento dinamico dello smorzatore, adattandolo alle caratteristiche della struttura meccanica da smorzare. La ricerca attualmente è rivolta all'analisi di quali circuiti elettrici attivi o passivi possano essere impiegati per tale scopo.

4.3.6 Sviluppo di un giunto motorizzato

É attualmente in fase di progettazione un giunto da installare all'estremità del braccio robotico flessibile di cui è dotato il banco sviluppato nell'ambito del contratto ASI ARS-98-166 e precedenti. La realizzazione di tale giunto permetterà di ottenere un braccio planare composto da due travi flessibili articolate in corrispondenza della "spalla" e del "gomito".

Pubblicazioni

- Tonoli, S. Oliva, S. Carabelli, P. Civera, Charge Driven Piezoelectric Transducers in Self-Sensing Configuration, Proceedings of SPIE - Smart Structures and Integrated Systems, Vol. 4327, pp. 743-752, Newport Beach (CA), 5-8 March 2001. (*)
- S. Carabelli A. Tonoli, System Properties of Flexible Structures with Self-Sensing Piezoelectric Transducers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 235, No. 1, pp. 1-23., 2000. (*)
- Tonoli and A. Festini and E. Zenerino, Controllo Delle Vibrazioni Di Strutture Flessibili Mediante Smorzatori Dinamici a Correnti Parassite, Atti Del XXX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana Per l'Analisi Delle Sollecitazioni, pp. 1511-1521, Alghero (SS), 12-15 Settembre 2001.

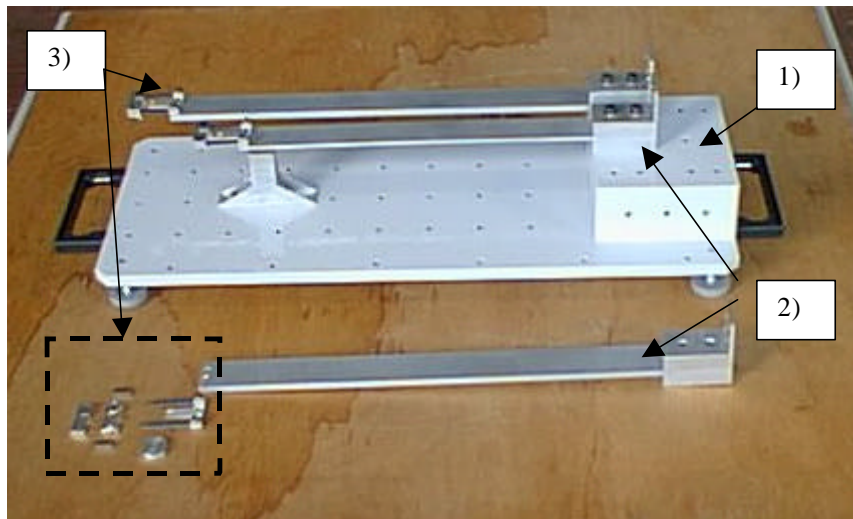


Figura 2 : dimostratore comprendente: 1) basamento, 2) travi flessibili dotate di elemento di connessione integrato, 3) smorzatori dinamici

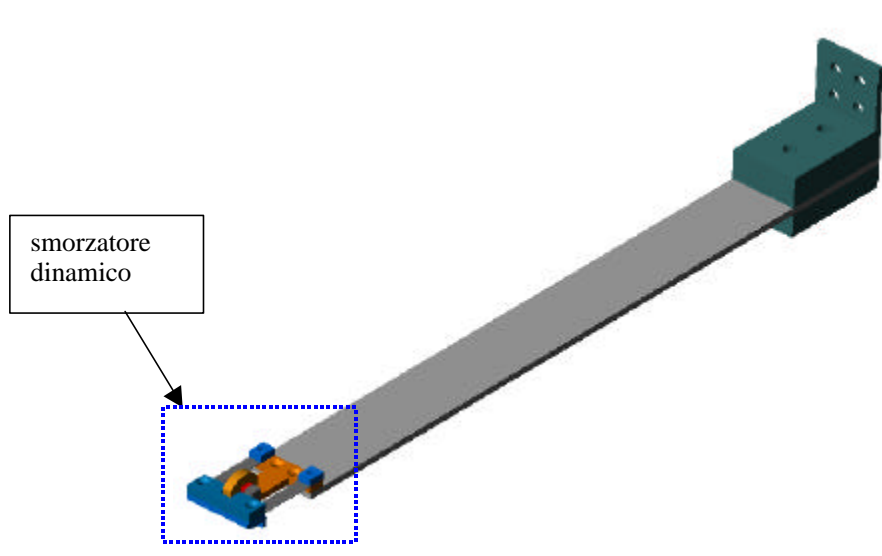


Figura 3: schema della trave con smorzatore dinamico a correnti parassite connesso all'estremità libera

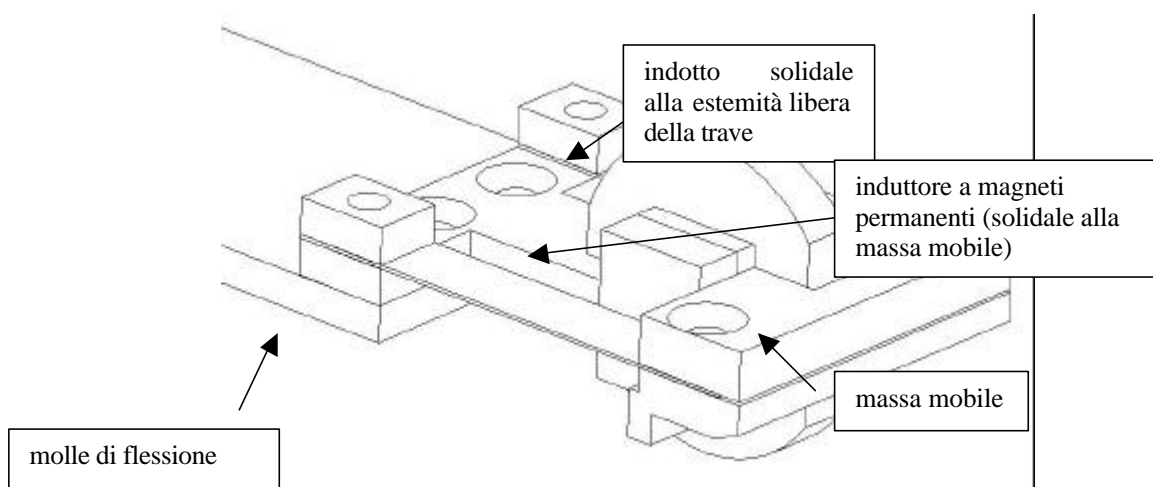


Figura 4 configurazione dello smorzatore dinamico a correnti parassite

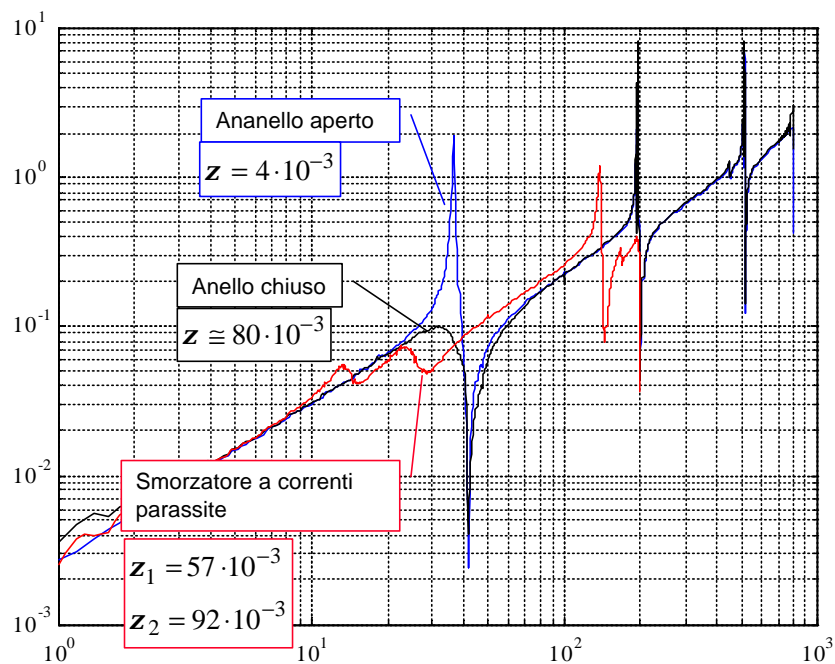


Figura 5: caratterizzazione dinamica della trave con smorzatore a correnti parassite e con controllo attivo basato su piezoelettrici

5 Attività dell'Unità di ricerca DIA-RO3

5.1 Riassunto in Italiano

Le attività di ricerca svolte dall'Unità di Roma Tre hanno riguardato la realizzazione di un simulatore a grafica 3D di ausilio all'operatore per il controllo a distanza di telemanipolatori: il simulatore realizzato, sebbene ancora ad un primo livello di prototipo, utilizza le informazioni sensoriali provenienti dal robot, i dati ottenuti sulla base di simulazioni effettuate in tempo reale di un modello accurato del robot stesso, e dei dati che si possono ottenere per mezzo dell'elaborazione di immagini dello spazio operativo, acquisite da webcam. Per le trasmissioni dati si è utilizzata la rete Internet.

5.2 Abstract in English

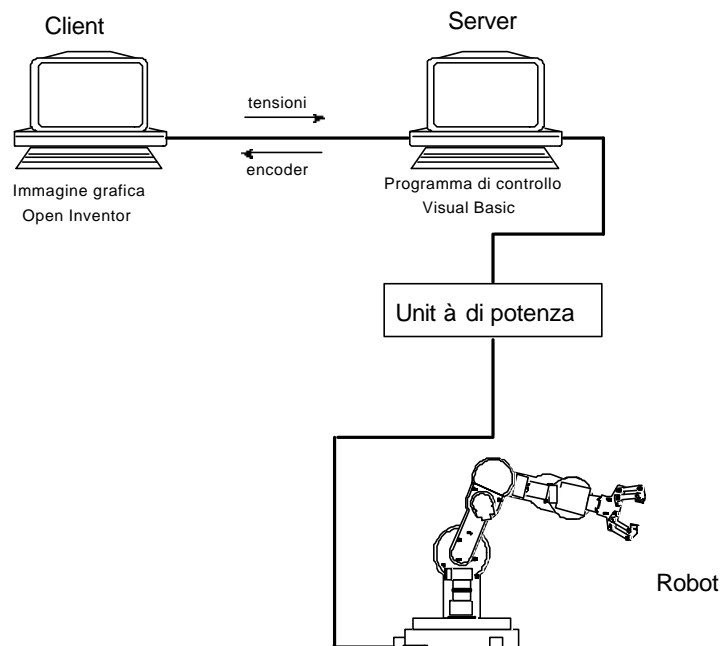
The research activities of the Unit Roma Tre have been focused on the realization of a 3D graphical simulator, to be used as an aid to the operator for the remote control of a telemanipulator: the simulator thus realized, although it is at a beta release stage, utilizes the sensors data obtained from the robot encoder, the data obtained by computer simulations of an accurate model of the robot, and the data that can be obtained by analyzing the images of the working space captured by a webcam. The Internet network has been used for the data transmission.

5.3 Descrizione della Ricerca svolta

Le attività svolte dall'Unità di Roma Tre, riportate in ordine cronologico ed equamente suddivise per quanto riguarda gli aspetti finanziari, sono state le seguenti, utilizzando il manipolatore ScortecII, a struttura antropomorfa, dotato di una architettura di controllo totalmente aperta alla realizzazione di nuove leggi e strutture, sia teoriche sia architetture.



1) Si è progettata e quindi realizzata una architettura hardware per il controllo a distanza, per mezzo della rete internet, del manipolatore robotico. Questa struttura è basata su protocollo client-server, con il server (detto programma di controllo, e realizzato in Visual Basic) che esercita le opportune azioni e che scambia, utilizzando il protocollo TCP/IP, informazioni e dati con gli altri programmi client. I client, nel caso particolare, sono i programmi per la resa grafica, di simulazione in tempo reale del modello del robot, i predittori, i programmi per l'estrazione di informazioni posturali, di cui si riferisce nei paragrafi seguenti.

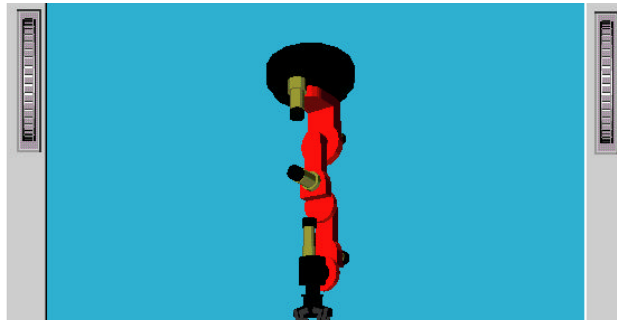


2) Si è progettata e quindi realizzata in Open Inventor un'interfaccia grafica 3D che utilizza per l'animazione grafica le misure sensoriali ricevute dal robot remoto. Il programma è stato realizzato sia per windows (su base Visual C++), sia per Silicon Graphics (su base C++), può essere implementato sia sulla stessa macchina che effettua il controllo, sia su macchina remota, con l'unico vincolo che la comunicazione sia realizzata su protocollo TCP/IP.

3) Si è progettata e quindi realizzata in Open Inventor una seconda interfaccia grafica 3D che utilizza per l'animazione grafica i dati di un modello (il quale, in modo adattativo, tiene in conto i dati sensoriali ricevuti fino a quel momento) del robot che viene simulato in locale.

4) Si è progettata e quindi realizzata in Open Inventor una interfaccia grafica 3D che utilizzi per l'animazione grafica i dati provenienti da una telecamera (si è utilizzata una Web Cam, di facile interfacciamento via Internet). Con questa interfaccia, sono stati realizzati opportuni algoritmi per l'estrazione di misure posturali.

5) Si sono effettuate una serie di verifiche sperimentali, nelle quali si è effettuato il controllo a distanza (per il momento all'interno dello stesso dominio IP), utilizzando la rete internet come mezzo di trasmissione.



Publicazioni

- M. Indri, A. Tornambè, “Robust Control of a Simple Mechanical System Subject to Impacts”, *3rd IFAC Symposium on Robust Control Design (ROCOND '2000)*, Praga, CZ, Giugno 2000. (*)
- M. Indri, A. Tornambè, “Design of an Output Feedback Control Law for a Mechanical System Subject to Impacts: Output Regulation and Impact Insensitivity”, *2nd International Symposium on Impact and Friction of Solids, Structures and Machines*, Montreal, Canada, 8-12 Agosto 2000. (*)
- M. Indri, A. Tornambè, “Impact Control of a Single-Link Robot Striking Different Environments: Theoretical and Experimental Investigation”, *European Journal of Control*, vol. 6, n. 4, pagg. 322-337, 2000. (*)
- M. Indri, A. Tornambè, “On the Design of a Position Feedback Control Law for a Simple Mechanical System Subject to Impacts”, *International Journal of Control*, vol. 74, n.8, 857-872, 2001. (*)
- L. Menini and A. Tornambè, “Asymptotic tracking of periodic trajectories for a simple mechanical system subject to non-smooth impacts,” *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 46, pp. 1122-1126, July 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, “Velocity observers for linear mechanical systems subject to single non-smooth impacts,” *Systems & Control Letters*, no. 43, pp. 193-202, 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, “Control of mechanical systems subject to non-smooth impacts,” *IFAC Annual Reviews in Control*, vol. 25, pp. 25-42, 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, “Exponential and BIBS stabilization of one-degree-of-freedom mechanical systems subject to single non-smooth impacts,” *IEE Proc. Control Theory and Applications*, vol. 148, pp. 147-155, March 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, “Control of mechanical systems subject to unilateral constraints,” *SIAM news*, pp. 10-11, November 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, “Control of mechanical systems subject to non-smooth impacts,” in *IFAC Conference “Control Systems Design”*, Bratislava (Slovakia), 2000. 12 pagine.
- L. Menini and A. Tornambè, “The use of the barrier method for the impact analysis in mechanical systems,” in *IFAC Conference “Control Systems Design”*, Bratislava (Slovakia), 2000. 6 pagine.
- L. Menini and A. Tornambè, “Dead-beat control laws for impacting systems in presence of uncertainties,” in *39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3181-3182, Sidney (Australia), 2000.
- L. Menini and A. Tornambè, “Asymptotic tracking of periodic trajectories for a simple mechanical system subject to non-smooth impacts,” in *39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 5059-5064, Sidney (Australia), 2000.

- L. Menini and A. Tornambè, "Tracking of admissible "rolling" trajectories for a rocking block," in *9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, Dubrovnik, Croatia, 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, "Mechanical systems subject to inequality constraints: design of velocity observers," in *IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems Design (NOLCOS'01)*, Saint Petersburg (Russia), June 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, "Stabilization of simple mechanical systems subject to inequality constraints," in *Proc. of European Control Conference*, Porto (Portugal), September 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, "Modelling and control of an impacting flexible circular ring," in *Proc. of European Control Conference*, Porto (Portugal), September 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, "Modification of the Youla-Kucera parameterization for linear mechanical systems subject to non-smooth impacts," in *40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando (FL, USA), December 2001.
- L. Menini and A. Tornambè, "Use of non-smooth impacts for the control of (otherwise) uncontrollable linear mechanical systems," in *40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando (FL, USA), December 2001.

(*) Pubblicazione di autori appartenenti a differenti unità del progetto di ricerca.

Torino, lì 29/01/2002