

## Curricula e Elenco delle pubblicazioni del prof. Giovanni Ulivi

### Indice

1	Curriculum vitae	2
2	Attività didattica	2
3	Attività organizzativa in campo scientifico	3
4	Attività di ricerca	4
4.1	Macchine a induzione e convertitori statici . . . . .	6
4.1.1	Convertitori di potenza e tecniche di modulazione. . . . .	6
4.1.2	Osservatori bilineari per le macchine asincrone. . . . .	7
4.1.3	Controllo ottimo e ad orientamento di campo negli azionamenti con motori asincroni. . . . .	8
4.1.4	Controllo con controreazione non lineare di macchine asincrone. . . . .	8
4.2	Strutture di calcolo per l'implementazione di tecniche evolute di controllo. . . . .	9
4.3	Robotica . . . . .	10
4.3.1	Controllo a sliding mode . . . . .	10
4.3.2	Modellistica e controllo di bracci robotici °essibili. . . . .	12
4.3.3	Inseguimento di traiettorie con apprendimento iterativo nel dominio della frequenza . . . . .	14
4.3.4	Controllo ad apprendimento iterativo dello stato nale . . . . .	15
4.3.5	Metodi di aggregazione di dati sensoriali e di pianificazione delle traiettorie . . . . .	17
4.3.6	Metodi reattivi per evitare gli ostacoli . . . . .	19
4.3.7	Metodi di localizzazione . . . . .	20
5	Elenco delle pubblicazioni	21

## 1 Curriculum vitae

Il prof. Giovanni Ulivi è nato a Roma il 20.11.50 ed ha conseguito la Laurea in Ingegneria Elettronica il 24.5.74. Ha sostenuto l'esame di stato nella primavera del 1976 ed ha seguito il Corso di Specializzazione in Ingegneria dei Sistemi di Controllo e Calcolo Automatici nel 1977.

Dal 26.5.74 al 31.7.74 ha avuto un contratto con il Centro di Studi dei Sistemi di Controllo e Calcolo Automatici del CNR sui problemi di simulazione degli invertitori di potenza con raddrizzatori controllati al silicio.

Dal 23.9.74 al 15.1.76 ha prestato il servizio militare come sottotenente del genio aeronautico continuando a frequentare l'Istituto di Automatica nell'ambito del contratto di ricerca esistente con le F.S.

Dal 16.1.76 al 31.6.76 ha lavorato presso la ditta Contraves come progettista, interessandosi a tecniche impulsive di potenza nel campo dei trasmettitori radar.

Dal 1.7.76 al 31.7.81 ha usufruito di un assegno biennale di formazione scientifica e didattica presso l'Istituto di Automatica dell'Università di Roma.

Dal 1976 inizia lo studio e la sperimentazione sugli azionamenti e sui convertitori di potenza.

Nel 1980 comincia ad interessarsi alla realizzazione di dispositivi di controllo con microcalcolatori.

Dichiarato idoneo al giudizio per ricercatori confermati ha preso servizio presso lo stesso Istituto, attualmente Dipartimento di Informatica e Sistemistica (DIS), il 1.8.81 ed ha optato per il tempo pieno.

Nel 1986, anche grazie alla sopravvenuta disponibilità di un prototipo di robot industriale, inizia l'attività di ricerca e sperimentazione nel campo della robotica.

Nel 1990, avvia gli studi sulla logica fuzzy e la sperimentazione su robot mobili.

Nel novembre 1992, ha vinto il concorso a posti di professore associato per il raggruppamento I24 ed è stato chiamato a tenere il corso di Elementi di Automatica, presso la Facoltà di Ingegneria della nuova Università di Roma TRE, dove è arrivato prima al Dipartimento di Meccanica e Automatica (DMA) e successivamente al Dipartimento di Informatica e Automazione (DIA).

## 2 Attività didattica

L'attività didattica del Prof. Giovanni Ulivi si è svolta nell'ambito dei Corsi di Laurea in Ingegneria Informatica, Elettronica, Aeronautica e Meccanica, oltre che in corsi post-laurea.

Negli a.a. 1983-84 e 1984-85 è stato incaricato dell'insegnamento di Tecniche di Controllo Digitale nell'ambito del Corso di Specializzazione in Ingegneria dei Sistemi di Controllo e Calcolo Automatici.

Ha tenuto per supplenza il corso di Elementi di Automatica, fondamentale per i corsi di Laurea in Ingegneria Meccanica ed Aeronautica, nell'a.a. 1991-92, presso la facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "La Sapienza" e di Teoria dei Sistemi (nell'a.a. 1993-94) presso l'Università di Cassino.

Attualmente è professore associato per il raggruppamento K04X (ex I24) e tiene il corso di Fondamenti di Automatica presso la Facoltà di Ingegneria della Università di Roma TRE. Il corso è impartito a studenti in Ingegneria Informatica, Elettronica e Meccanica.

Svolge per supplenza i corsi di Strumentazione e Misure per l'Automazione, del corso di laurea in Ingegneria Informatica presso lo stesso Ateneo e, fino allo scorso anno a.a. (1997-1998), ha tenuto quello di Fondamenti di Automatica, del corso di laurea in Ingegneria Aeronautica, presso "La Sapienza".

Nell'ultimo anno ha iniziato una sperimentazione sulla didattica assistita da calcolatore nei corsi di cui è responsabile.

Nel sito: [www.dia.uniroma3.it/autom/](http://www.dia.uniroma3.it/autom/)

sono presenti i link ai corsi citati e ai laboratori, dove sono disponibili le informazioni, il materiale didattico e il software didattico, specificamente sviluppati.

È stato membro della Commissione per la Didattica di Ateneo.

È membro del Consiglio del Corso di Dottorato in Ingegneria dei Sistemi (consorzio tra le due Università) per il quale ha tenuto cicli di lezioni su "Sensori ed attuatori per la robotica avanzata" e "Controllo di Sistemi con Tecniche Fuzzy". Segue la formazione di diversi studenti di dottorato (nell'ultimo anno, due).

Continua a seguire tesi di laurea all'Università "La Sapienza", nell'ambito dei corsi citati e di quello di Robotica Industriale.

È stato invitato a svolgere lezioni presso scuole di dottorato: "Scuola di Dottorato CIRA" (Bertinoro, 1997), "Scuola Estiva sul Controllo Fuzzy" (Ferrara, 1998), "Scuola su Logiche Polivalenti e loro Applicazioni" (Ravello, 1996).

Inoltre tiene i corsi di controlli presso la Scuola Trasporti e Materiali dell'Esercito Italiano.

### **3 Attività organizzativa in campo scientifico**

È stato responsabile del Laboratorio di Robotica del DIS; ha contribuito alla realizzazione dell'analoga struttura del DIA, che ora dirige. Entrambe le strutture ospitano diversi studenti di dottorato.

È stato ed è titolare di fondi di ricerca del MURST, del CNR (Progetto Finalizzato Robotica), dell'ENEA (Progetto Antartide, Robotica per Ambienti Estremi) e dell'ASI, in qualità di responsabile delle Unità Operative del DIS e del DIA.

È membro (dal 1983) dei Technical Committees IFAC (International Federation for Automatic Control) per la Robotica (con funzioni di segretario), per i Veicoli Autonomi e per la Strumentazione ed ha partecipato all'organizzazione di diversi eventi dell'IFAC, tra i quali gli ultimi due World Congress (S. Francisco, 1996 e Pechino, 1999). Per il secondo, è stato responsabile del referee delle sessioni dedicate alla robotica.

È responsabile locale della rete CEE ERUDIT (Open Network of Excellence for Uncertainty Modeling and Fuzzy Technology), in precedenza è stato membro del gruppo di lavoro CEE FALCON (Fuzzy Algorithms for Control, ora terminato).

Ha fatto parte dell'International Program Committee o del National Organizing Committee di diversi congressi internazionali. Svolge funzioni di referee per molte riviste internazionali, prevalentemente nel settore dei controlli e della robotica.

È stato membro delle Commissioni di Concorso a posti di Ricercatore (raggruppamento K04X Automatica) presso le Università di Cassino (1995) e di Genova (1999).

## 4 Pro- lo dell'attività di ricerca

### Introduzione

L'attività di ricerca del professor Giovanni Ulivi è iniziata presso il Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università degli Studi di Roma, La Sapienza, nell'ambito dei gruppi di ricerca guidati dal professor Mario Murgò (con l'aiuto del prof. Armando Bellini) e in seguito dal professor Fernando Nicolò. Successivamente ha sviluppato i propri interessi di studio presso lo stesso Dipartimento, dove è stato nominato responsabile del Laboratorio di Robotica, e quindi, dopo il passaggio alla Università di Roma TRE, presso il Dipartimento di Informatica e Automazione, dove ha costituito il locale Laboratorio di Robotica e Misure per Sistemi Complessi, nonché quello didattico per l'area Automatica.

Le attività hanno riguardato temi di interesse dell'area Automatica e sono state sempre motivate dalla ricerca di un equilibrio tra approfondimenti metodologici e convalide sperimentali. L'approfondita conoscenza di processo acquisita nei settori degli azionamenti, della robotica industriale e della robotica mobile hanno dato spunto alla individuazione o proposizione delle metodologie di controllo più promettenti dal punto di vista della specifica applicazione; quando possibile le metodologie sviluppate sono state convalidate da sperimentazioni di laboratorio su prototipi appositamente costruiti o adattati. Questo approccio ha consentito di approfondire anche aspetti realizzativi (particolarmente per quanto riguarda convertitori di potenza, microcalcolatori, processori digitali di segnali e strutture meccaniche) che facevano riferimento a tecnologie non consolidate e che imponevano soluzioni innovative. In questo tipo di attività, diversi studenti di dottorato, che hanno prestato la loro collaborazione con impegno e determinazione, hanno avuto modo di formarsi nell'area della ricerca sperimentale.

Le attività possono essere articolate come segue:

#### ≈ Macchine a induzione e convertitori statici

- { Convertitori di potenza e tecniche di modulazione
- { Osservatori bilineari dello stato
- { Controllo ottimo ed a orientamento di campo
- { Controllo con controreazione non lineare

#### ≈ Strutture di calcolo per l'implementazione di tecniche evolute di controllo

#### ≈ Robotica

- { Controllo a Sliding Mode di traiettoria e di forza
- { Modellistica e controllo di bracci robotici °essibili
- { Inseguimento di traiettorie con apprendimento iterativo nel dominio della frequenza
- { Controllo ad apprendimento iterativo dello stato nale
- { Metodi di aggregazione di dati sensoriali (Sensor Fusion) e di piani- cazione delle traiettorie
- { Metodi reattivi per evitare gli ostacoli (Obstacle Avoidance)
- { Metodi di localizzazione

La ricerca sul controllo delle macchine a induzione e sui convertitori statici è stata la logica conseguenza dell'inserimento nel gruppo di ricerca del professor Mario Murgò. Inizialmente questa ricerca è stata caratterizzata da forti contenuti tecnologici che si sono concretizzati nella realizzazione di un invertitore a transistor e

dei circuiti di commutazione per invertitori a raddrizzatori controllati. Sempre in relazione al tema dei convertitori statici, sono state sviluppate diverse tecniche di modulazione basate sull'ottimizzazione delle perdite del motore. Questa linea di ricerca si è poi evoluta affrontando temi di natura più metodologica. In particolare sono stati sviluppati un osservatore per lo stato del motore a induzione (il cui modello è bilineare), alcuni metodi per il controllo ottimo e ad orientamento di campo ed infine controllori con feedback non lineare, che hanno consentito di riformulare in modo esatto, sia il ben noto controllo ad orientamento di campo, che il classico controllo in frequenza.

L'obiettivo di realizzare prototipi di laboratorio e la necessità di valutare le diverse scelte di implementazione delle tecniche di controllo che si andavano sviluppando, ha portato all'apertura di un'altra linea di ricerca orientata alla progettazione e alla realizzazione di strutture di calcolo in tempo reale dedicate al controllo. In questo settore i risultati più interessanti consistono nella realizzazione del dispositivo di pilotaggio di un invertitore trifase con una scheda a microcalcolatore e nello sviluppo di un sistema multimicro basato su processori digitali di segnali (DSP).

Le conoscenze relative agli azionamenti industriali e al controllo digitale, sviluppate con le attività già ricordate, hanno avuto un naturale sbocco nella Robotica. La ricerca in quest'area, nata alla Sapienza sotto l'impulso del prof. Nicolò, ha coperto diversi temi ed è tuttora quella principale. Inizialmente, si è rivolta ai problemi di controllo di manipolatori industriali supposti rigidi. Per superare le difficoltà causate dalle forti non linearità ed in particolare dagli attriti secchi comuni ai manipolatori con alti rapporti di riduzione, e presenti nel prototipo disponibile (MIMO CRF), si è innanzitutto sviluppato un dispositivo di controllo a sliding mode. Impiegando questa piattaforma, si sono considerati problemi di inseguimento di traiettorie e di controllo di forza. Queste attività hanno consentito di realizzare uno dei primi ambienti per la sperimentazione di tecniche di controllo di forza in Italia. Anche le ricerche sul controllo per apprendimento nel dominio della frequenza hanno consentito di ottenere risultati sperimentali allineati con la più avanzata ricerca internazionale.

Successivamente, l'interesse si è esteso alle strutture flessibili. È stato progettato e realizzato un braccio robotico a due link, di cui il secondo molto flessibile, su cui è stato applicato un originale sensore di deformazioni. Questa struttura è la base di molte attività di ricerca in maggioranza relative a modellistica, controllo non lineare e controllo ad apprendimento.

Ultima in ordine di tempo, è iniziata l'attività di ricerca e sperimentazione sui robot mobili. Le problematiche studiate si possono dividere in tre aree: controllo del punto di arrivo, percezione e pianificazione. La prima ha visto la formulazione di tecniche di controllo iterativo dello stato impiegate su modelli di robot car-like in chained form (forma canonica per sistemi anolonomi). La seconda comprende problematiche di costruzione automatica di mappe dell'ambiente, affrontate impiegando i metodi della logica fuzzy. L'approccio, anche metodologicamente originale, ha ricevuto notevole interesse sia da parte della comunità robotica, che di quella dei matematici del settore. Sempre alla percezione si possono ricondurre anche le ricerche sui metodi reattivi per evitare gli ostacoli e quelle sulla stima della posizione (localizzazione) del robot rispetto all'ambiente. La terza, strettamente connessa alla precedente, ha visto lo sviluppo di metodi adatti alla pianificazione di cammini che utilizzano l'informazione, detta da incertezza, riportata dalle mappe a livelli di grigio generate con le tecniche suddette.

Molti dei prototipi cui si fa riferimento sono riportati nel sito

[www.dia.uniroma3.it/autom/LabRob](http://www.dia.uniroma3.it/autom/LabRob),

in modo graficamente più dettagliato di quanto non sia possibile negli articoli a stampa.

In seguito si descrivono in dettaglio le varie linee di attività e (evidenziato tipograficamente) il contenuto dei singoli articoli.

## 4.1 Macchine a induzione e convertitori statici

### 4.1.1 Convertitori di potenza e tecniche di modulazione.

Le problematiche relative ai convertitori statici di potenza per il controllo dei motori in corrente alternata sono strettamente connesse a quelle relative al controllo dei motori stessi, in quanto le prestazioni dell'intero azionamento dipendono fortemente dalle caratteristiche del convertitore. Questa considerazione ha indirizzato lo svolgimento delle ricerche in oggetto verso le soluzioni più convenienti per l'intero sistema, pur senza trascurare gli aspetti circuitali e componentistici.

In [23] viene proposto un nuovo circuito di commutazione per invertitori a raddrizzatori controllati di tipo Mc Murray, che ha permesso di ottenere una significativa riduzione dell'energia immagazzinata e della corrente massima di commutazione. Il circuito proposto è stato applicato su un prototipo di azionamento con motore asincrono per un locomotore di manovra sviluppato in collaborazione con l'Istituto Sperimentale delle Ferrovie dello Stato.

In [24] viene illustrata la realizzazione di un invertitore di media potenza a transistori. Tale soluzione consente una notevole riduzione delle perdite, delle dimensioni e dei costi e rende interessante l'impiego di azionamenti con motori asincroni in un più vasto campo di applicazione. Nel lavoro viene svolta un'analisi delle scelte di progetto e del dimensionamento delle reti di protezione, che devono essere progettate tenendo conto della presenza del motore come carico.

In [26] si ricava il modello esatto di un azionamento per trazione con motore asincrono composto da un invertitore e da un convertitore alternata/continua monofase di nuova concezione che permette una sostanziale riduzione della potenza reattiva assorbita e dell'inquinamento armonico prodotto. Una particolare implementazione del modello su un elaboratore digitale consente sia di ottenere direttamente le caratteristiche statiche dell'azionamento, sia di ridurre il tempo di calcolo necessario per la simulazione del comportamento dinamico.

In [36] e [3] si propone un nuovo metodo di controllo degli invertitori con uscita sinusoidale, generalmente impiegati nei gruppi di continuità di alimentazione. Tradizionalmente il dispositivo di controllo utilizzato si basa sulla sola misura del valor medio o  $\pm$  cace della tensione di uscita; nel lavoro si dimostra la convenienza di effettuare la controreazione dal valore istantaneo della tensione di uscita per migliorare le caratteristiche di linearità e di robustezza rispetto ai disturbi del sistema. La tecnica di modulazione proposta (modulazione a rapporto) permette di superare gli inconvenienti tipici di questo approccio, consistenti nella necessità di sovradimensionare la tensione continua di alimentazione dell'invertitore. I criteri di progettazione suggeriti vengono quindi applicati per la realizzazione di un prototipo di laboratorio e convalidati da rilievi sperimentali.

Ancora più di quelle relative ai convertitori statici, le problematiche connesse con la scelta delle forme d'onda con cui alimentare i motori in corrente alternata rivestono una notevole importanza nel comportamento degli azionamenti. I lavori qui riuniti affrontano essenzialmente questo tema e quello dei relativi algoritmi di calcolo. Gli aspetti più strettamente connessi con l'impiego di microcalcolatori sono invece trattati nelle memorie [27, 28, 1], discusse in altro paragrafo.

In [31] viene proposta una nuova tecnica di modulazione adatta per il calcolo in linea degli istanti di commutazione. La tecnica è stata ricavata prendendo in considerazione l'intero sistema trifase, a differenza di quanto fatto coi metodi classici in cui la modulazione è effettuata singolarmente per ogni fase. Essa produce contenuti armonici

di coppia, corrente e tensione nettamente migliori di quelli causati dall'impiego della tecnica della sottoscillazione ed inoltre un più ampio campo di linearità del legame ingresso-uscita del modulatore. L'algoritmo di calcolo degli istanti di commutazione, adatto all'implementazione su microcalcolatore risulta meno oneroso di quelli relativi alla classica sottoscillazione.

In [33] viene presentata una tecnica di modulazione che può essere utilizzata nel caso di azionamenti con motori asincroni con reazione dallo stato, che impiegano grandezze di controllo diverse da quelli controllati in frequenza. La tecnica è stata ricavata considerando in maniera globale le commutazioni delle tre fasi dell'invertitore in modo da minimizzare il numero di commutazioni necessarie per ottenere i valori desiderati per le grandezze di controllo.

In [34] è mostrato come la stessa tecnica di modulazione possa essere derivata da un'opportuna implementazione su microcalcolatore della tecnica della sottoscillazione, avente periodo della portante multiplo di quello di campionamento, con una opportuna modifica delle durate degli intervalli di conduzione. Un approfondito confronto tra le due tecniche mostra che quella proposta permette di ottenere un maggior campo di linearità e un contenuto armonico più favorevole.

In [38] le forme d'onda generate da un invertitore a ponte sono ricavate mediante la minimizzazione di un indice di costo legato o al contenuto armonico della corrente o a quello della coppia meccanica. Innanzitutto vengono descritti i vincoli fisici che debbono essere soddisfatti dagli istanti di commutazione, successivamente si descrivono gli algoritmi di ottimizzazione, particolarmente efficienti, in genere i miglioramenti ottenuti con la procedura proposta rispetto ai risultati dati dalla tecnica della sottoscillazione vengono verificati con estensive simulazioni.

In [42] si affronta lo stesso problema focalizzando l'attenzione sugli aspetti implementativi. In particolare il lavoro fornisce una descrizione dei vincoli sugli istanti di commutazione e sulla loro successione particolarmente adatta alla realizzazione di queste tecniche mediante microcalcolatori.

#### 4.1.2 Osservatori bilineari per le macchine asincrone.

Un problema tipico che si presenta nel controllo di macchine elettriche asincrone di usuale costruzione è la pratica impossibilità di misurare direttamente sia la corrente nei circuiti rotorici che i flussi magnetici di rotore e di statore. D'altra parte alcune di queste grandezze compaiono necessariamente come variabili di stato nel modello della macchina e la loro conoscenza è quindi necessaria per l'impiego di tecniche di controllo con reazione dallo stato. Diversi approcci presenti nella letteratura prevedono la simulazione dei circuiti rotorici per ricavare una delle suddette quantità (vettoriali), ma in genere risentono fortemente delle variazioni dei parametri del motore. Una diversa e più appropriata tecnica è quella di impiegare un osservatore dinamico dello stato, sintetizzato tenendo conto della natura bilineare del modello della macchina.

In [25] viene ricavato il modello di un osservatore di ordine ridotto dello stato di una macchina asincrona, vista come sistema bilineare e se ne descrive una realizzazione di tipo analogico. Una indagine sulla sensibilità alle variazioni dei parametri ed i risultati sperimentali confermano la validità dell'osservatore proposto.

In [37] lo stesso osservatore è portato nel dominio del tempo discreto e si discute la sua implementazione su un microcalcolatore, considerando gli effetti del campionamento e dei troncamenti sulla precisione complessiva.

In [4] l'argomento è notevolmente approfondito e si mostra come lo stesso schema di principio possa essere utilizzato sia per la stima del flusso rotorico che di quello statorico; la trattazione dei due casi è pertanto unitaria. Oltre alle problematiche implementative sono descritti i criteri per la scelta dei parametri dell'osservatore.

#### 4.1.3 Controllo ottimo e ad orientamento di campo negli azionamenti con motori asincroni.

Il problema dell'impiego di tecniche di controllo ottimo con reazione dallo stato per la sintesi di azionamenti con motore asincrono è reso notevolmente complesso dalla non linearità delle equazioni che descrivono il motore e dalla necessità di evitare che le sue variabili di stato (correnti e angoli) superino predeterminati valori che consentono un corretto funzionamento della macchina. Inoltre, il controllore è generalmente realizzato mediante un dispositivo tempo-discreto e le dinamiche dei circuiti elettrici sono tali da richiedere tempi di campionamento assai ridotti; è quindi necessario che gli algoritmi di controllo consentano un'esecuzione sufficientemente veloce.

In [19] viene proposto un primo approccio per il controllo ottimo in linea di azionamenti con motori asincroni, consistente nella suddivisione del problema in due sottoproblemi che possono essere risolti separatamente a causa della differenza tra la velocità dei comportamenti dinamici delle variabili dei circuiti elettromagnetici e quella della variabile meccanica. La validità dell'approccio è confermata per simulazione.

In [30] il metodo viene sviluppato nei suoi aspetti applicativi al fine di valutare la possibilità di implementazione con un microcalcolatore. Il lavoro dimostra che, impiegando i moderni (all'atto della pubblicazione) microcalcolatori a 16 bit, esso è effettivamente realizzabile e che consente di limitare il consumo della macchina e la corrente da essa assorbita anche durante transitori veloci, permettendo così di ridurre il dimensionamento dei dispositivi di potenza a semiconduttore.

In [32] viene effettuato un confronto tra diverse possibilità di applicazione di tecniche di controllo ottimo, tenendo conto delle prestazioni ottenibili e della complessità degli algoritmi necessari. Vengono analizzate quattro diverse possibilità, ognuna caratterizzata da una particolare scelta delle variabili di controllo; per ciascuna sono determinate le leggi di controllo e le prestazioni ottenibili.

In [35] e [2] si valuta l'utilizzazione di una tecnica di controllo ottimo, specifica per i sistemi bilineari, che prevede di considerare come grandezza di controllo del motore, oltre alle proiezioni della tensione di alimentazione, anche la frequenza di scorrimento. La sensibilità alle variazioni dei parametri elettrici del motore e gli effetti prodotti da errori di misura della velocità di rotazione ne risultano notevolmente ridotti. Il lavoro mostra come un'opportuna scelta dei parametri di peso dell'indice di qualità permetta di ottenere una notevole semplificazione degli algoritmi. Applicando il pacchetto di simulazione precedentemente citato in [29], è stato possibile definire la struttura e i parametri più significativi dell'implementazione su microcalcolatore e valutare le prestazioni in diverse condizioni di funzionamento.

In [39] si mostra come l'osservatore descritto in [25, 37] permetta la realizzazione del controllo diretto ad orientamento di campo per motori asincroni eliminando la necessità di stimare in linea i parametri di macchina. Il controllore dell'angolo di rotore è sintetizzato risolvendo un'equazione di Riccati, mentre quello delle correnti statoriche è ottenuto per inversione delle equazioni che ne descrivono la dinamica non lineare.

#### 4.1.4 Controllo con controreazione non lineare di macchine asincrone.

I metodi di controllo basati sull'impiego di controreazione non lineare si sono dimostrati un validissimo strumento di progetto nel campo dei sistemi non lineari. La loro applicazione al controllo dei motori asincroni, sistemi tipici di tale classe, è stato quindi il logico proseguimento degli studi precedenti ed ha portato a risultati originali.

In particolare le tecniche di controllo non lineare hanno permesso di riformulare le ben note tematiche del controllo ad orientamento di campo, fornendo una legge di controllo per coppia e modulo dell'angolo lineare e non interagente. Le stesse hanno

inoltre permesso una nuova formulazione del classico controllore che utilizza come grandezze di controllo il modulo della tensione di alimentazione e la sua frequenza (al posto delle usuali proiezioni su un riferimento rotante del vettore rappresentativo della tensione stessa).

In [44] e, successivamente, in [8], il problema è affrontato per la prima volta e si dimostra che è possibile determinare un controllore statico con controreazione non lineare dallo stato, che fornisce la linearizzazione ed il disaccoppiamento del sistema, senza creare dinamiche inosservabili ad anello chiuso. Una digressione sulla scelta delle variabili di uscita dimostra come queste non possano essere scelte arbitrariamente. Alcune simulazioni convalidano i risultati teorici.

In [45] vengono impiegati, come grandezze di controllo, modulo e frequenza della tensione di alimentazione, scelta che facilita la realizzazione dei convertitori statici che alimentano il motore. Nel lavoro si mostra che per ottenere linearizzazione e disaccoppiamento dei legami ingresso-uscita è necessario l'uso di un controllore non lineare dinamico e che rimane una parte inosservabile nel sistema, la cui dimensione dipende dalle uscite scelte. La sua stabilità è dimostrata mediante simulazioni.

In [49] il problema della scelta delle uscite e della stabilità delle parti inosservabili che possono rimanere nel sistema dopo la linearizzazione dei legami ingresso-uscita è ulteriormente approfondito. La natura fisica delle dinamiche inosservabili viene chiarita e se ne ottengono le espressioni esplicite, che consistono di cicli limite stabili.

## 4.2 Strutture di calcolo per l'implementazione di tecniche evolute di controllo.

L'importanza dei calcolatori nei moderni sistemi di controllo è andata continuamente crescendo, fino a diventare preponderante rispetto a quella dei componenti analogici. Lo studio e l'accorta utilizzazione di questi componenti, dai primi microcalcolatori, ai Digital Signal Processors, sono stati essenziali per l'implementazione e la sperimentazione di diversi metodi evoluti di controllo.

Gli articoli riuniti in questo paragrafo trattano principalmente delle modalità di impiego dei calcolatori, sia nella soluzione di uno specifico problema [27, 28, 1], sia nella realizzazione di strutture hardware e software di impiego abbastanza generale. Realizzazioni più particolari, finalizzate alla validazione di specifici metodi di controllo, sono citate nei relativi paragrafi.

In [27] viene affrontato il problema dell'utilizzazione di un microcalcolatore per generare forme d'onda modulate adatte all'alimentazione di motori in corrente alternata. Nel lavoro viene ricavata una formalizzazione delle proprietà di simmetria e regolarità di tali forme d'onda al fine di ricondurle ad operazioni logiche facilmente implementabili dal microcalcolatore. Queste sono utilizzate nella struttura produttore-consumatore del dispositivo di comando. Inoltre viene mostrata l'opportunità di impiegare, al variare della frequenza di alimentazione, due diverse tecniche di modulazione. In particolare alle basse frequenze è conveniente effettuare il calcolo in linea degli istanti di commutazione, mentre alle frequenze più elevate è preferibile ricorrere ad una loro tabulazione ottenuta fuori linea mediante l'ottimizzazione di una opportuna cifra di merito.

In [28] l'approccio descritto è approfondito e dettagliato negli aspetti realizzativi, descrivendo la realizzazione su una scheda a microcalcolatore del dispositivo di pilotaggio di un invertitore trifase a ponte di elevata potenza. Alle basse frequenze gli istanti di commutazione sono determinati secondo la tecnica della sottoscillazione implementata mediante la soluzione approssimata in forma chiusa delle equazioni trascendenti che la descrivono. I risultati riportati dimostrano la validità dell'approccio proposto.

In [1] viene descritta la realizzazione su un microcalcolatore del dispositivo di controllo di un invertitore trifase, mostrando come una particolare organizzazione del programma e delle strutture dati permetta di svincolare il numero di commutazioni al secondo

dalla velocità del microcalcolatore impiegato. Il lavoro mostra, inoltre, come valutare i parametri essenziali del dispositivo (dimensioni della memoria, ecc.) in base alle specifiche dell'azionamento.

In [29] viene presentato un pacchetto di simulazione che consente di analizzare il comportamento di un sistema costituito da processi tempo-continui e da controllori implementati con microcalcolatori. Il pacchetto consente di tenere conto delle discretizzazioni temporali, degli errori di troncamento introdotti dalle operazioni aritmetiche e di quelli di discretizzazione dovuti alla presenza di convertitori analogico/digitali e digitale/analogici e costituisce un valido ausilio nella progettazione di tali controllori.

In [40] e in [5] si descrive il progetto e la realizzazione di un sistema di interfaccia tra un prototipo di robot industriale ed un sistema multimicro MODIAC implementato su bus M3. Dopo una descrizione dei due sistemi, ed in particolare un'analisi delle caratteristiche del sistema sensoriale del robot, il lavoro presenta la parte hardware dell'interfaccia (una scheda M3-bus compatibile, che consente l'impiego alternativo di diversi integrati periferici per una maggior flessibilità) e la parte software, scritta in assembler Z8000 che permette ai programmi utente di utilizzare la scheda in modo trasparente, senza conoscerne in dettaglio le caratteristiche tecniche.

In [48] viene descritto un ambiente hardware e software per la sperimentazione a fini didattici di controllori per manipolatori industriali. La struttura descritta risulta particolarmente flessibile e la sua parte software permette sia l'implementazione dei controllori in un linguaggio ad alto livello, che l'analisi dei risultati delle esperienze fatte, mediante post-elaborazione dei dati acquisiti durante gli esperimenti.

In [50] e in [11] viene proposto un sistema multimicro di elevate prestazioni, progettato specificamente per l'impiego in sistemi di controllo evoluto; esso consiste di schede basate sui Digital Signal Processors della serie TMS in numero di variabile a seconda della potenza di calcolo richiesta. Le schede sono collegate ad un calcolatore ospite (in genere un Personal Computer). La particolare architettura del sistema è motivata da considerazioni sul tipo e sulla frequenza delle comunicazioni necessarie in una gerarchia di controllori, considerazioni che si riflettono sui meccanismi di colloquio fra i processori. Il sistema è stato realizzato nel laboratorio del Dipartimento di Informatica e Sistemistica ed è stato impiegato in diverse ricerche.

## 4.3 Robotica

### 4.3.1 Controllo a sliding mode

I lavori nel settore della robotica coprono un insieme di argomenti piuttosto vasto. Qui sono raggruppati gli articoli concernenti l'inseguimento di traiettorie ai giunti con controllori a struttura variabile (sliding mode) associati a leggi controllo non lineare. L'abbinamento dei due approcci consente di migliorare la robustezza di semplificare l'implementazione della parte non lineare e, contemporaneamente, di mantenere ridotto il valore delle potenzialmente dannose coppie di chattering del controllore sliding mode. Successivamente, basandosi sui risultati già ottenuti per il controllo di posizione, si è passato a considerare il problema del controllo di forza secondo la formulazione ibrida (si veda dopo).

Nella conduzione delle ricerche, un particolare ruolo è stato svolto dalla presenza in laboratorio di un prototipo di manipolatore articolato (MIMO, realizzato dal Centro Ricerche Fiat) che, opportunamente modificato, ha consentito di effettuare numerose sperimentazioni ed ottenere indicazioni realistiche sull'effetto e l'entità dei rumori e dei disturbi in gioco.

#### Inseguimento di traiettorie

In [43] e [7] viene analizzata la possibilità di associare un controllore sliding mode ad una controreazione non lineare dallo stato per il controllo di manipolatori. Il sistema

ad anello chiuso ottenuto risulta completamente disaccoppiato e linearizzato ed ha ottime caratteristiche di robustezza, pur con ridotti fenomeni di chattering (fenomeni originati dalle discontinuità degli andamenti delle coppie) grazie all'impiego del concetto di boundary layer al posto di quello di switching surface. Sul sistema così ottenuto, è quindi possibile disegnare un controllore a tempo di assestamento finito; di questo sono analizzate le caratteristiche di comportamento rispetto ai rumori ed agli errori di misura.

In [41] e [6] si descrive la realizzazione sperimentale del controllore precedentemente citato. Essa si compone di una parte analogica e di una parte implementata su un Personal Computer. Vengono riportati i risultati di diversi esperimenti atti a mettere in luce le caratteristiche salienti del sistema di controllo. In particolare misure sofisticate permettono di verificare che le coppie di chattering, grazie agli accorgimenti presi, risultano di gran lunga inferiori a quelle con andamento continuo.

In [53] si verifica che la stessa metodica di controllo può essere applicata a manipolatori direct-drive, privi cioè di riduzioni meccaniche nell'accoppiamento tra motori e giunti. In questo tipo di robot l'accoppiamento dinamico tra i diversi giunti e le non linearità sono notevolmente enfatizzate; ne consegue che la struttura del controllore va modificata per tener conto di tali fenomeni, come risulta anche dalle simulazioni riportate.

In [93], prendendo lo spunto dalle realizzazioni di laboratorio di controllori a sliding mode, si sottolinea il ruolo determinante della sperimentazione nell'ambito delle ricerche di robotica condotte presso il D.I.S.

#### Controllo ibrido di forza e posizione.

Questa linea di ricerca analizza e approfondisce il paradigma del controllo ibrido di forza e posizione, secondo il quale un robot in contatto con una superficie è controllato in posizione (o velocità) lungo le direzioni tangenti alla superficie stessa e in forza lungo quella normale. Anche in questo caso il problema della scarsa conoscenza dei valori dei parametri del modello dinamico è stato affrontato adottando al controllore non lineare un controllore a "sliding mode".

Chiaramente per la corretta applicazione della metodica di controllo è essenziale ottenere una buona conoscenza dell'orientamento della superficie e delle caratteristiche di attrito ed elasticità del contatto. Errori su questi parametri, come mostrato in uno dei lavori, possono indurre elevati errori; il problema è risolto grazie ad una particolare procedura di identificazione.

I notevoli risultati sperimentali che si stavano ottenendo non hanno potuto dispiegarsi nella produzione scientifica attesa, a causa di un guasto irreparabile alla struttura meccanica.

La ricerca è stata sviluppata principalmente nell'ambito del Progetto Finalizzato Robotica del CNR.

In [46] si affronta il problema del controllo ibrido di forza e posizione di un robot e si dimostra che l'impiego di una struttura mista composta da un controllore non lineare e da uno a sliding mode, permette di ottenere disaccoppiamento e linearizzazione esatti della dinamica complessiva, con un'elevata robustezza del controllore. C'è semplicemente di gran lunga la struttura dello stesso e consente di ottenere prestazioni elevate, verificate tramite estensive simulazioni.

In [62] si descrive la realizzazione sperimentale dello schema derivato nel lavoro precedente. Un'accurata analisi degli algoritmi e una loro corretta implementazione consente di ottenere risultati ragguardevoli pur impiegando un calcolatore di potenza modesta. Nell'articolo si analizzano gli effetti di una errata conoscenza dell'ambiente, riscontrati anche nelle esperienze di laboratorio. Queste consentono anche di mettere in luce l'effetto di attriti ed elasticità ai giunti.

In [65] si presenta e si verifica sperimentalmente un metodo di identificazione in linea che permette di determinare l'orientamento della superficie su cui il robot sta muovendo.

dosi esercitando la forza prescritta. Come mostrato all'inizio della pubblicazione, le sole misure di forza o di posizione, pur teoricamente sufficienti allo scopo, non consentono di identificare correttamente la superficie a causa di rumori e disturbi. Si propone pertanto di sfruttarle entrambe, secondo un approccio di sensor fusion, mediante un metodo ai minimi quadrati ricorsivi.

In [70] il controllore sviluppato nel lavoro precedente viene adattato al caso in cui il manipolatore porti una mola per operazioni di sbavatura. Questa configurazione introduce un'elevata rumorosità delle misure di forza e una ulteriore forza tangente nel punto di contatto, dipendente in parte dalla forza normale. Dopo un'analisi di queste azioni disturbanti, vengono descritti i filtri impiegati per ridurre il rumore e le modifiche all'algoritmo di identificazione. Come dimostrato dalle sperimentazioni, il sistema di controllo è risultato capace di produrre stabilmente forze di contatto dello stesso ordine di grandezza di quelle rumorose, indotte dall'attività della mola e dal movimento lungo la superficie.

#### 4.3.2 Modellistica e controllo di bracci robotici flessibili.

Il controllo di bracci robotici flessibili pone delicati problemi, legati alla loro natura infinito-dimensionale del modello e alla presenza di una parte inosservabile (dinamica zero) che può risultare a fase non minima. Ciò accade ad esempio qualora come uscita del sistema si scelga la posizione dell'estremità libera del braccio. A ciò si aggiungono, in strutture multi-link, le usuali non linearità che si incontrano nei sistemi meccanici articolati.

In questo caso non è più possibile ottenere linearizzazione e disaccoppiamento esatti ma, rilassando le richieste all'inseguimento esatto di traiettorie prestabilite, è possibile ricavare leggi di controllo basate sulla teoria del regolatore non lineare.

Questo approccio caratterizza molti degli articoli qui riportati, che inoltre trattano di argomenti di modellistica e della realizzazione di un braccio sperimentale. Il prototipo è risultato utilissimo nella convalida dei modelli e nello studio degli effetti dello spill-over sulle metodiche di controllo.

Degli articoli riguardanti il controllo per apprendimento iterativo si dà conto in altra parte.

In [47] si affronta il problema dell'inversione della dinamica di bracci robotici flessibili, sia in linea che fuori linea, al fine di ottenere l'inseguimento esatto di traiettorie date. Si propone anche un metodo che, nel caso di generazione fuori linea dei profili di coppia, permette di suddividere le variabili di stato in due gruppi per ridurre il numero di equazioni da risolvere e la complessità dei calcoli. Nel lavoro si analizzano anche le proprietà di stabilità, dimostrando come queste dipendano dalla scelta della grandezza di uscita, fornendo un'interpretazione fisica del risultato. Un semplice ma significativo modello di braccio flessibile è impiegato per illustrare i risultati.

Lo stesso problema è affrontato in [9], ove sono forniti ulteriori approfondimenti e vengono effettuate alcune simulazioni a riprova di quanto esposto.

In [51] si illustra la realizzazione di un sensore, che consente la misura contemporanea delle deflessioni in più punti, adatto ad essere impiegato nel controllo di bracci robotici flessibili. Esso si basa su un semplice schema ottico e fornisce eccellenti prestazioni grazie ad un'analisi delle sorgenti di errore ed ai provvedimenti presi per ridurre gli effetti. In particolare si usa un semplice circuito adattativo per compensare la variazione di flusso luminoso e un anello ad aggancio di fase per aumentare la risoluzione. I risultati di misure di precisione e ripetitività effettuati in laboratorio concludono il lavoro.

In [12] si affronta la realizzazione di un prototipo di robot direct-drive a due bracci: il primo rigido ed il secondo dotato di un'elevata flessibilità nel piano orizzontale. Il lavoro descrive la progettazione della parte meccanica e di quella elettronica (sensori, azionamenti, interfaccia verso un calcolatore) e fornisce infine il modello dinamico del-

la struttura, con diverse considerazioni sulle possibilità di semplificazione dei modelli, supportate da confronti tra simulazioni e risultati sperimentali. Il prototipo in oggetto è ancora utilizzato nelle ricerche sperimentali su robot flessibili.

In [54] si ricava un modello Lagrangiano di un braccio flessibile con carico all'estremità, calcolando le espressioni esatte delle autofunzioni. Ciò consente di dimostrare l'equivalenza dei due modelli spesso presentati come diversi nella letteratura (essi differiscono per i sistemi di riferimento impiegati). Inoltre è possibile ricavare le trasformazioni di coordinate necessarie per il passaggio dall'una all'altra formulazione del modello. Una serie di rilievi sperimentali sulle frequenze proprie e sulle deformate del braccio convalida le ipotesi di partenza sulla struttura fisica.

L'articolo [55] è il primo in cui si affronta il problema dell'inseguimento esatto di traiettorie con l'estremità libera di un link flessibile. Il modello, semplice ma significativo, è non lineare e presenta una parte inosservabile (dinamica zero) a "fase non minima". La sintesi del controllore può essere efficacemente effettuata utilizzando la teoria del regolatore non lineare. Alcune simulazioni convalidano la sintesi effettuata e permettono di verificare il miglior comportamento del regolatore non lineare rispetto a quello di uno lineare approssimato.

In [56] l'approccio viene ulteriormente sviluppato, analizzando diverse alternative per la sintesi dell'intero sistema di controllo e la possibilità di inseguire anche traiettorie che non soddisfano le ipotesi della teoria originale del regolatore. In particolare le simulazioni presentate mostrano la possibilità di seguire traiettorie di tipo spline, di maggior interesse per la realizzazione di spostamenti da punto a punto.

In [57] la parte metodologica è sviluppata per il progetto di un braccio a più link con flessibilità. L'articolo comprende anche alcune considerazioni sul calcolo delle traiettorie di riferimento, che in questo caso diviene alquanto complesso.

In [58] vengono analizzati diversi algoritmi di controllo della posizione dei giunti, che vanno dal controllore PD alla computed torque effettuata considerando gli effetti della flessibilità. Un unico ambiente hardware/software permette di condurre esperimenti e valutare i risultati ottenibili nell'inseguimento di traiettorie con i diversi controllori. Numerose prove sperimentali dimostrano i miglioramenti ottenibili con gli algoritmi più sofisticati e permettono inoltre di convalidare il modello ricavato.

In [94] si effettua un confronto tra i diversi metodi di controllo: controllo per inversione, regolazione non lineare, apprendimento iterativo. Il confronto è effettuato parte per simulazione, parte ricorrendo a risultati sperimentali e consente di concludere che, qualora il modello sia noto con buona approssimazione, l'approccio con la teoria del regolatore non lineare dà i risultati migliori, mentre quando esista incertezza sui valori dei parametri è preferibile impiegare il controllo per apprendimento.

In [88] viene ripreso il problema della regolazione non lineare per un robot con link flessibili. Nell'articolo vengono presentati 3 metodi di calcolo per ricavare un controllore per inversione che sia stabile e che consenta quindi deformazioni limitate del braccio sotto l'azione di una controreazione dallo stato che garantisce anche una sufficiente robustezza del controllore. Nell'articolo viene anche analizzata la possibilità di ricavare il termine di feed-forward con le tecniche proprie del controllo per apprendimento iterativo.

In [66] viene derivato un'osservatore ridotto per lo stato del robot flessibile. La struttura delle equazioni del modello e l'impiego delle usuali misure dai giunti del robot consentono di avere un osservatore limitato alle sole deformazioni del braccio, caratterizzato per giunta da una dinamica lineare. Quest'ultima proprietà è utile nell'imporre il comportamento intrinseco dell'osservatore rispetto ai rumori introdotti dai sensori e alle dinamiche non modellate. Il comportamento dell'osservatore è valutato sperimentalmente sia ad anello aperto che ad anello chiuso, impiegando un semplice controllore progettato seguendo un approccio alle perturbazioni singolari.

Lo studio dei bracci flessibili ha toccato anche altre tematiche. In [63] si impiega un approccio frequenziale per lo smorzamento attivo delle vibrazioni di un braccio flessibile. L'articolo mostra che la tecnica delle modi strutturali, propria della meccanica

delle vibrazioni, può essere ricondotta ad uno schema a controreazione ed illustra una procedura di ottimizzazione per i parametri di un controllore lineare. Il lavoro costituisce tra l'altro una collaborazione con colleghi di altre discipline.

L'impiego di reti neurali nella modellistica e nel controllo di sistemi complessi ha ricevuto un notevole interesse. In [67] si sono volute verificare le possibilità offerte da tali sistemi nel modellare un link flessibile con ingresso e uscita scelti in punti diversi (modello a fase non minima). I risultati sono stati abbastanza interessanti, ma non superiori a quelli ottenibili disponendo di un modello in forma analitica.

#### 4.3.3 Inseguimento di traiettorie con apprendimento iterativo nel dominio della frequenza

Il controllo per apprendimento iterativo è una tecnica relativamente nuova per la progettazione di dispositivi di controllo la quale, almeno per una particolare classe di problemi, può essere impiegata per superare alcune delle tradizionali difficoltà associate con la progettazione dei sistemi di controllo. Più specificamente, tale tecnica consente di migliorare le prestazioni di inseguimento di traiettorie o quelle di errore sullo stato finale per processi, macchine e sistemi che eseguono lo stesso movimento o operazione ripetutamente. Esempio classico è quello di un manipolatore industriale che insegue più volte lo stesso compito in una linea di assemblaggio.

L'approccio è giustificato dall'osservazione che, se il controllore del sistema è fisso e le condizioni operative del sistema sono le stesse ogni volta che il compito viene eseguito, allora gli errori dell'uscita saranno ripetuti durante ogni ciclo operativo. Questi errori possono essere registrati durante il funzionamento e quindi impiegati per calcolare opportune modifiche al segnale di controllo che saranno applicate al sistema durante il prossimo ciclo operativo, affinché non si ottenga un determinato livello nelle prestazioni.

La ricerca nel campo del controllo iterativo è incentrata sullo sviluppo di algoritmi per l'aggiornamento del segnale di controllo. La parola iterativo sta a significare il modo di funzionare del procedimento di aggiornamento, mentre la parola apprendimento è legata all'aggiornamento del segnale sulla base degli errori commessi nel precedente ciclo operativo.

L'idea, del tutto generale, descritta precedentemente si è sostanziata in due linee di ricerca dedicate a classi di problemi e di sistemi diverse fra di loro e differenziate in questa e nella successiva sezione.

La prima linea di ricerca ha come obiettivo il miglioramento delle prestazioni dinamiche di inseguimento di traiettoria per sistemi lineari. Per il progetto dell'algoritmo di controllo si impiegano tecniche basate nel dominio della frequenza che, se applicabili formalmente solo a sistemi lineari, consentono viceversa di descrivere il modo notevolmente semplice le condizioni di convergenza e gli eventuali errori residui dell'algoritmo.

Gli aspetti più originali della ricerca sull'apprendimento iterativo nel dominio della frequenza consistono nell'introduzione di un meccanismo che consente di limitare il processo di apprendimento ad una prescritta banda di frequenze e nello sfruttamento delle possibilità di elaborazione non causale offerte. Il primo punto fornisce notevoli doti di robustezza agli algoritmi anche rispetto a dinamiche non modellate del sistema, il secondo è determinante nel disegno di controllori per strutture flessibili. Queste caratteristiche ne hanno permesso la sperimentazione su strutture con caratteristiche di elasticità che presentano numerosi modi di vibrazione e comportamento a fase non minima ed anche a sistemi che presentano fenomeni di non linearità non molto accentuati, come i manipolatori industriali.

In [52] e [10] si descrive la realizzazione di un controllore ad apprendimento su traiettorie ripetitive per un manipolatore industriale. Nella prima parte del lavoro viene

esposto un nuovo algoritmo di apprendimento e ne sono analizzate le condizioni di convergenza, formulandole, per un sistema lineare, nel dominio della frequenza. L'approccio permette di definire l'algoritmo di apprendimento ottimo e mostra la possibilità di escluderne le dinamiche non modellate ad alta frequenza che inciderebbero sulla stabilità del sistema. La classe di sistemi cui la metodica di controllo risulta applicabile risulta così notevolmente allargata. La seconda parte della memoria è dedicata alla sperimentazione su un prototipo di robot industriale, effettuata impiegando il sistema multimicro descritto in [11] e all'analisi dei risultati ottenuti sul prototipo, che convalidano i risultati della prima parte.

In [59] la stessa tecnica è utilizzata per l'inseguimento esatto di traiettorie con l'estremità di un braccio robotico flessibile, il cui modello non sia esattamente noto. Nell'esposizione della tecnica di controllo si evidenzia l'assenza degli usuali vincoli di causalità nell'elaborazione del segnale di feed-forward. Questa considerazione permette di stabilire relazioni con approcci diversi anch'essi sviluppati nel dominio della frequenza, che peraltro richiedono un accurato modello dinamico del braccio. Sono sintetizzati quattro diversi controllori, utilizzando modelli ottenuti da approssimazioni crescenti; nell'ultimo vengono trascurate anche le caratteristiche di fase non minima del braccio. Numerose simulazioni permettono di verificare il corretto funzionamento dei controllori proposti.

In [60] i risultati descritti in [59] sono utilizzati per la realizzazione sperimentale del controllore ad apprendimento su un personal computer interfacciato al robot flessibile. Dopo un riepilogo delle caratteristiche rilevanti della tecnica proposta, viene descritto l'ambiente utilizzato per le sperimentazioni. I risultati ottenuti confermano la validità delle analisi e la pratica applicabilità del metodo.

In [79] viene ripreso l'inseguimento di traiettorie per apprendimento nel dominio della frequenza delle strutture flessibili. La tecnica viene applicata a un braccio costituito da due link (di cui il secondo molto flessibile) soggetto alla forza di gravità. La convergenza e la robustezza dell'intero algoritmo è dimostrata teoricamente, con un approccio alle perturbazioni singolari, e verificata con risultati sperimentali.

In [61] si verifica che il controllo ad apprendimento può essere vantaggiosamente impiegato nel controllo di manipolatori con elasticità ai giunti. La struttura del controllore proposta è leggermente diversa da quelle precedentemente descritte. L'algoritmo di controllo sfrutta anche in questo caso l'assenza di vincoli di causalità, ma risulta più complesso che nei casi precedenti. Esso comunque consente di ottenere buone prestazioni anche in termini di riduzione delle vibrazioni del braccio, come dimostrato anche per simulazione.

In [69] viene descritta la modifica del controllore preesistente di un tipico robot industriale (COMAU SMART 6.12), secondo la metodologia considerata, in collaborazione con la Tecnospaio SpA. Per massimizzare i miglioramenti ottenibili, si è proceduto ad una sessione di identificazione del modello dinamico del sistema. I confronti sperimentali mostrano come il controllore modificato mostri un errore di inseguimento di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quello originale.

#### 4.3.4 Controllo ad apprendimento iterativo dello stato finale

La seconda linea degli studi sul controllo iterativo è stata dedicata prevalentemente al controllo di sistemi lineari e non lineari con l'obiettivo di forzare il raggiungimento di un predeterminato valore delle variabili di stato in un tempo dato (state steering o riposizionamento), problema di notevole interesse pratico e che risulta poco trattato in letteratura. La metodologia proposta si basa sulla parametrizzazione delle leggi di controllo, che risultano quindi ristrette ad una classe di funzioni del tempo, determinata dalla scelta delle funzioni di base dell'espansione parametrica. L'approccio, inizialmente proposto per sistemi lineari, si è dimostrato in grado di reiettare anche perturbazioni non lineari e quindi ha consentito di controllare

sistemi complessi come i robot con elasticità e i sistemi nonolonomi, in particolare i robot mobili.

Un'originale estensione della metodologia, proposta negli ultimi articoli, consente di ottimizzare un indice di costo della prestazione durante la fase di apprendimento dei parametri ottimi.

#### Robot flessibili

In [68] si affronta il problema del riposizionamento di un robot con un link flessibile; caso complicato anche dalla presenza di una dinamica zero non stabile, in quanto l'uscita è presa all'estremità del link flessibile. Il modello del robot viene espresso come modello lineare con perturbazioni non lineari e non stazionario e si mostra, sia con argomentazioni teoriche che con risultati sperimentali, come sia possibile applicare il metodo proposto e portare il braccio nel punto nominale senza oscillazioni residue.

In ([71]) si affrontano gli stessi problemi del precedente, ma con un ulteriore approfondimento degli aspetti metodologici. Viene dimostrata la capacità degli algoritmi iterativi di riposizionamento dello stato di azzerare gli effetti di una vasta classe di disturbi, come ad esempio quelli, ripetitivi, dovuti alla gravità. La presenza di un disturbo nominale, di entità incognita a priori, ha richiesto alcune modifiche dell'algoritmo di controllo. Il metodo è convalidato da prove sperimentali.

La versione su rivista [16] riprende e amplia i risultati precedenti. Dopo aver presentato l'algoritmo di ricerca della legge di controllo per il braccio flessibile, si dimostra la possibilità di considerare il sistema come linearmente perturbato, e quindi di impiegare un algoritmo di apprendimento lineare, capace di reiettare un'ampia classe di disturbi. Inoltre si analizza la robustezza rispetto a dinamiche ad alta frequenza non modellate. Alcuni esperimenti convalidano la trattazione metodologica.

In [85], viene introdotta l'idea di minimizzare un dato criterio di costo mentre si apprende una legge di controllo in grado di pilotare il sistema da un punto di equilibrio ad un altro. Il metodo è applicato al controllo di un robot con due link, di cui il secondo molto flessibile, che si vuol far muovere tra due posizioni, mentre si minimizza la coppia massima applicata. L'intero algoritmo di controllo presenta ottime caratteristiche, sia come velocità di convergenza, che come capacità di respingere una larga classe di disturbi. Le valutazioni metodologiche sono state convalidate da diverse prove sperimentali.

#### Robotica Mobile

In [83] mostra una prima applicazione del controllo iterativo finito dimensionale ad un robot mobile con modello car-like. Le caratteristiche di robustezza di questo tipo di controllo garantiscono che le traiettorie ottenute portano il robot esattamente nella posizione desiderata anche in presenza di perturbazioni rispetto al modello nominale.

In [18] (versione su rivista di [82]) viene presentato un controllore iterativo che può essere applicato a sistemi nonolonomi, come i robot mobili ed altri, che possono essere messi in chained form (una forma canonica per questi sistemi). L'algoritmo presentato sfrutta il fatto che tali sistemi sono lineari quando gli ingressi sono costanti a tratti. Lo schema proposto richiede l'esecuzione di un piccolo numero di esperimenti al fine di pilotare il sistema allo stato nominale desiderato in un tempo finito e presenta buone caratteristiche di convergenza e robustezza rispetto a incertezze nel modello e a disturbi. Per superare la necessità di dover inizializzare esattamente il sistema ad ogni iterazione, il metodo base è stato modificato in modo da ottenere un controllore ciclico, in cui il sistema è ripetutamente guidato attraverso una sequenza di stati arbitraria. Per dimostrare la validità del metodo, è stato impiegato un robot mobile car-like e sono state condotte sia simulazioni che sperimentazioni che hanno dimostrato il buon funzionamento dell'approccio.

In [86], in [92] e [98] (submitted) viene anche mostrato come, anche nel caso di sistemi non olonomi, si possano introdurre ulteriori gradi di libertà utilizzabili per mi-

minimizzare iterativamente una vasta classe di funzioni di costo (come, ad esempio, la curvatura della traiettoria) mentre si effettua l'apprendimento dei parametri.

#### 4.3.5 Metodi di aggregazione di dati sensoriali e di pianificazione delle traiettorie

Una parte notevole della ricerca in robotica mobile è costituita da studi sulla navigazione autonoma in ambienti noti o sconosciuti. La capacità di reagire a situazioni impreviste, di tollerare incertezze e imprecisioni nei modelli impiegati, di adattare il proprio comportamento all'ambiente circostante, richiede metodi di misura, stima e, più in generale di acquisizione in tempo reale di informazione dai sensori installati a bordo. In quest'ottica, l'autonomia del sistema può essere vista come una generalizzazione del concetto di controreazione e offrire ampi spazi per l'impiego di concetti propri dell'Automatica, spesso mediante l'introduzione di nuove metodologie.

I sensori più utilizzati forniscono la distanza dall'ostacolo visibile più vicino (range finders) ed in genere si basano sull'energia riflessa dagli ostacoli stessi. In pratica nessuno dei sensori comunemente disponibili è esente da difetti di varia natura; i più frequenti sono una scarsa risoluzione angolare, la sensibilità a disturbi esterni, la differente risposta ai vari tipi di materiale di cui è costituito l'ambiente. Tipico esempio è quello dei sensori ad ultrasuoni, diffusissimi per impiego in interni. Tali difetti influenzano tutti i componenti del sistema di navigazione e, in genere, non sono descrivibili in termini di rumore additivo sulle misure. La riduzione dei loro effetti sull'informazione acquisita richiede tecniche alquanto sofisticate che hanno come denominatore comune l'aggregazione di un numero elevato di misure provenienti da più sensori (sensor fusion).

Gli argomenti di ricerca qui ricondotti sono relativi alla realizzazione di mappe dell'ambiente con sensori di larga diffusione e di modeste caratteristiche, quali quelli ad ultrasuoni, e alla specializzazione di metodi di pianificazione dei cammini sulle mappe così ottenute. Altre sezioni sono dedicate all'obstacle avoidance e alla localizzazione. Tutte le ricerche sono state supportate da un'estesa attività sperimentale, necessaria per la natura stessa dei problemi affrontati.

La realizzazione di mappe è stata affrontata in modo originale con metodi basati sulla logica fuzzy e sulla teoria dell'evidenza di Dempster e Shafer. Inoltre, per confronto, è stato anche valutato l'approccio Bayesiano. Il problema della pianificazione ha richiesto la riformulazione di metodi classici, relativi a mappe certe, funzionali alla natura delle mappe che riportano, punto per punto, i valori relativi ai rischi di collisione.

L'articolo [95], successivamente pubblicato su rivista in versione estesa come [13], introduce, per la prima volta, l'impiego di un approccio fuzzy nel riconoscimento di ambienti mediante sensori ad ultrasuoni. Tra le prerogative di questi dispositivi sono da annoverare l'economicità, la robustezza ma anche il largo lobo di radiazione e la facilità di dare informazioni erranee dovute a riflessioni multiple, in particolare in ambienti chiusi da pareti piane. La mappa dell'ambiente è definita come l'insieme fuzzy dei punti pericolosi, la cui funzione di appartenenza quantifica la possibilità che un punto appartenga ad un ostacolo. La determinazione di questo insieme è basata su un modello del sensore facilmente estendibile ad altri tipi di sensori. La sperimentazione con un robot con sensori a ultrasuoni ha consentito di verificare il buon funzionamento dell'algoritmo, come confermato anche da confronti con metodi probabilistici. L'approccio proposto consente agevolmente di gestire le incertezze connesse alle misure e fornisce mappe dell'ambiente esplorato sufficientemente dettagliate ed attendibili per una successiva pianificazione dei cammini.

In [72] e, in forma più completa in [14], dopo aver riproposto, con alcuni aggiustamenti, il metodo di costruzione della mappa, si affronta il problema della pianificazione

dei cammini su mappe incerte, nelle quali, per ogni punto, un valore numerico quantifica la possibilità che il punto stesso appartenga ad un ostacolo. Per minimizzare la possibilità di collisioni il robot deve evitare le aree pericolose; a questo scopo vengono introdotte diverse funzioni di costo che caratterizzano il rischio lungo un cammino e che corrispondono a diverse strategie. La loro minimizzazione tramite un'appropriata implementazione dell'algoritmo  $A^*$  consente la determinazione del cammino ottimo. L'intero sistema è stato valutato in un ambiente reale con sperimentazioni condotte su un robot mobile Nomad 200.

Il capitolo [20] riprende con maggior respiro le tematiche precedenti, con una più accurata descrizione del modello dei sensori e delle sue motivazioni.

In [73] il problema della realizzazione delle mappe viene risolto con un approccio diverso, basato sull'applicazione della teoria dell'evidenza, che può essere riformulata nel contesto delle misure fuzzy, fornendo una chiara indicazione della contraddittorietà tra le diverse sorgenti di informazione. Il metodo risultante offre il vantaggio di una formulazione più rigorosa del problema ed inoltre richiede un minor numero di parametri di cui occorre scegliere i valori. Le prestazioni fornite durante gli esperimenti risultano leggermente inferiori a quelle ottenute col metodo descritto nei precedenti articoli. Un'ulteriore vantaggio, non ancora completamente analizzato, del metodo qui descritto consiste nella tempestiva segnalazione di eventuali variazioni cui l'ambiente vada incontro, ottenuta grazie alla facilità con cui si può mettere in luce il livello di contraddizione esistente tra le misure attuali e l'informazione già acquisita.

L'articolo [74] è dedicato ad un confronto fra diverse tecniche per la realizzazione di mappe dell'ambiente. In particolare vengono confrontati sia da un punto di vista metodologico, che da un punto di vista sperimentale, le prestazioni di metodi basati sull'approccio Bayesiano, sulla logica fuzzy, e sulla teoria della evidenza di Dempster-Shafer. Sia le considerazioni di metodo che le risultanze sperimentali hanno permesso di verificare che le prestazioni del secondo approccio basato sulla logica fuzzy sono leggermente superiori a quelle del terzo, mentre il primo ha caratteristiche di gran lunga inferiori.

In [17] e, in versione preliminare in [77], viene presentata una soluzione al problema di un robot mobile che si muova in un ambiente completamente sconosciuto. L'approccio si basa sull'esecuzione alternata di due processi fondamentali: la costruzione della mappa e la navigazione. Nel primo processo, vengono raccolte misure di distanza attraverso i sensori esterocezionali del robot e queste vengono elaborate per realizzare una rappresentazione locale dello spazio circostante. Le diverse rappresentazioni via via raccolte vengono integrate in una mappa complessiva escludendo le informazioni inconsistenti o contrastanti. Durante la fase di navigazione, un pianificatore basato sull'algoritmo  $A^*$  genera un cammino locale dalla posizione corrente del robot a quella finale. Il cammino è sicuro all'interno dell'area già visitata e fornisce indicazioni per ulteriori esplorazioni al di fuori di questa. Il robot segue il cammino fino ai limiti dell'area già nota e si ferma se vengono incontrati ostacoli inattesi. Gli aspetti più interessanti di questo metodo sono l'impiego della logica fuzzy per costruire una mappa dell'ambiente che può essere facilmente aggiornata e l'applicazione iterativa di  $A^*$ . L'intera struttura è stata provata impiegando un robot mobile Nomad 200 ed ha fornito risultati molto buoni sia in ambienti statici che moderatamente dinamici.

In [75] si presentano due diversi metodi per la pianificazione del cammino sulle mappe incerte che offrono il vantaggio di essere incrementali e quindi più efficienti nel caso di robot mobili che debbono riconoscere l'ambiente man mano che procedono verso la loro destinazione. I due metodi sono ricavati riformulando quello noto come metodo dei potenziali artificiali, proposto da Barraquand e Latombe. Il primo, più semplice, produce cammini che passano rasente alle aree pericolose, il secondo, viceversa, ha una complicazione superiore ma produce cammini più sicuri.

In [76] e in [15] viene presentato un nuovo algoritmo per la pianificazione del cammino di robot mobili su mappe incerte che impiega una procedura di "scheletrizzazione"

della mappa. Al tal fine è stato necessario estendere il concetto di diagramma di Voronoi al caso di mappe a scala di grigi (utile anche per mappe altimetriche) e ricavare un algoritmo originale per la sua determinazione. I cammini così trovati si trovano "in posizioni equidistanti dagli ostacoli" e garantiscono la massima sicurezza del percorso. Nella ricerca dei cammini è stato anche introdotto un vincolo di curvatura, necessario in molte applicazioni pratiche.

In [91] (e in modo più ampio nel capitolo [96] accettato, ma non ancora pubblicato) il problema della ricostruzione della mappa di un ambiente sconosciuto viene affrontato con l'impiego di due tipi di sensori alquanto diversi tra di loro, ultrasonici e basati su laser. In questo caso, oltre ad impiegare una sensor fusion cooperativa, è necessario l'impiego di una parte competitiva per la scelta delle misure più attendibili. Il metodo proposto è stato convalidato da risultati ricavati in un tipico ambiente di uso cioè.

#### 4.3.6 Metodi reattivi per evitare gli ostacoli

Uno dei componenti principali del sistema di controllo per un robot mobile è il meccanismo reattivo che consenta di evitare ostacoli imprevisti in fase di pianificazione (Obstacle Avoidance). In letteratura sono state proposte diverse soluzioni al problema. Quella qui ricavata (e dominata "metodo degli orizzonti fuzzy") presenta alcune vantaggi coi metodi basati su potenziali repulsivi. La tecnica proposta consente implementazioni di elevatissima efficienza e offre una grande flessibilità di impiego. Alcuni fuzzy sets, che traducono in modo chiaro le esigenze della specifica applicazione, consentono, infatti, di introdurre limitazioni alla curvatura, di modificare la velocità in prossimità di ostacoli e di limitare gli scostamenti dalla traiettoria originale.

Oltre che su tipici robot mobili, la tecnica è stata sperimentata su una carrozzella per disabili a guida assistita, realizzata presso il laboratorio. Per il ruolo essenziale che giocano questi metodi nella sua realizzazione, gli articoli relativi sono ricompresi in questo paragrafo.

In [84], viene introdotto l'approccio suddetto e ne viene descritta l'implementazione e i risultati ottenibili per un robot mobile Nomad 200.

In [80] viene descritta la realizzazione di una carrozzella per persone disabili che non sono in grado di utilizzare correttamente l'usuale joystick. Essa è stata ottenuta modificando un prodotto commerciale, sensorizzando i motori e interfacciando i dispositivi di controllo esistenti con un notebook di classe i486. L'utilizzatore impartisce i comandi con una semplice interfaccia vocale, il meccanismo di obstacle avoidance agevola la guida nonostante l'elevata "discretizzazione" di tali comandi.

La seconda parte del capitolo [21] descrive in modo molto più dettagliato il progetto della carrozzella, che ha suscitato notevole interesse ed è stato presentato in manifestazioni e programmi televisivi.

In [97] (accettato), si riporta la realizzazione di un sensore differenziale di pressione da applicare dietro la testa dell'utente che consente di impostare i comandi di direzione (mentre quelli di velocità sono ancora di tipo vocale). L'articolo mostra che le interazioni tra segnale di direzione e movimento della sedia sono trascurabili e che, comunque il feedback ingenerato sarebbe stabilizzante. Viene infine mostrata l'integrazione col meccanismo di obstacle avoidance e i risultati ottenuti nella guida del prototipo in un ambiente d'uso cioè.

I risultati salienti delle linee di ricerca relative all'impiego di tecniche fuzzy nella robotica mobile sono anche oggetto di due pubblicazioni di contenuto "tutorial", infatti alcuni degli argomenti di maggior interesse sono stati oggetto delle lezioni tenute alla Fuzzy Control Summer School del 1998, pubblicate in [22], mentre in [81] (keynote speech) viene fornita una panoramica dell'impiego di tecniche fuzzy nel settore della robotica mobile e in quello automobilistico.

Una prima pubblicazione  $\mu$  relativa all'analisi di diversi controllori fuzzy. Infatti, questi sistemi di controllo hanno ottenuto discreti successi, specialmente in casi caratterizzati da una ridotta conoscenza dei processi da controllare e da specifiche di controllo poco formalizzate. Spesso però la letteratura disponibile aveva un carattere prevalentemente applicativo e dimostrava uno scarso approfondimento sulle questioni metodologiche di fondo. In [64] si dimostra la superiorità di alcuni approcci che trovano fondamento nella teoria delle equazioni fuzzy su quelli di maggior successo per motivazioni prevalentemente tecnologiche. Si forniscono anche alcuni criteri di scelta fra le soluzioni analizzate.

#### 4.3.7 Metodi di localizzazione

La ricerca relativa alla localizzazione  $\mu$  stata inizialmente rivolta ai problemi di autonomia del robot mobile, con un articolo che propone un metodo di esplorazione con costruzione incrementale della mappa e contemporanea localizzazione sulle parti già note. Successivamente, si  $\mu$  rivolta al miglioramento delle prestazioni offerte dalle tecniche già presentate in letteratura e basate sul filtro di Kalman esteso (EKF), con alcuni interessanti sviluppi metodologici, relativi all'applicazione dell'EKF a sistemi in chained-form.

Tutti i risultati riportati sono stati {necessariamente} soggetti ad ampie sperimentazioni.

In ([78]) si affronta problema della localizzazione per un robot mobile dotato di range finder laser. La determinazione della posizione di un robot mobile rispetto all'ambiente  $\mu$  generalmente studiata assumendo che la posizione iniziale sia nota e che sia disponibile a priori una mappa attendibile dell'ambiente. L'articolo, viceversa, presenta un metodo che, mentre localizza il robot sulle parti note della mappa, ne ricostruisce le parti mancanti e, incrementalmente, disegna la mappa dell'intero ambiente. Sia la mappa che l'immagine sono rappresentate con una lista di segmenti; in particolare l'immagine  $\mu$  ottenuta attraverso un meccanismo di accorpamento delle misure laser. Vengono mostrati i risultati ottenuti con prove sperimentali.

In [87] e [90] si affronta il problema della localizzazione impiegando un filtro di Kalman esteso. Il metodo proposto presenta due aspetti originali: in primo luogo la matrice di covarianza delle misure odometriche  $\mu$  modificata durante il movimento sulla base delle velocità lineare e angolare del veicolo; inoltre le diverse parti della mappa sono state etichettate con valori che rappresentano la sensibilità delle misure sonar riportate.

L'impiego di un filtro di Kalman esteso richiede la linearizzazione locale sia della dinamica del sistema che delle equazioni di uscita. In [89], si mostra come sia conveniente esprimere il modello del sistema in chained form, al fine di eliminare la prima delle linearizzazioni necessarie per formulare l'algoritmo. Questo approccio consente di rendere lineare le equazioni di predizione dello stato e la relativa covarianza ed inoltre permette un modo più naturale per esprimere il rumore sulle misure di odometria.

## 5 Elenco delle pubblicazioni

### Articoli su rivista con referee internazionale

- [1] A high performance microcomputer-based control circuit for variable frequency inverters, "IEEE Trans. on Industrial Electronics", vol. IE-32, num. 1, pp. 62-70, 1985. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [2] A microcomputer-based optimal control system to reduce the effects of parametric variations and speed measurement errors in induction motor drives. "IEEE Trans. on Industry Applications", vol. IA-22, num. 1, pp. 42-50, 1986. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [3] Application of pulse-ratio-modulation to fixed frequency sinusoidal tracking inverters. "IEEE Trans. on Power Electronics", vol. PE-2, num. 4, pp. 10-87, 1987. In collaborazione con A. Bellini, A. De Santis, G. Figalli.
- [4] Analysis and design of a microcomputer based observer for an induction machine. "Automatica", vol. 24, num. 4, 1988, pp. 549-555. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [5] An interface system between an industrial robot and a multimicro process computer. "Robotics and Computer Integrated Manufacturing", vol. 5, num. 2, pp. 207-214, 1989. In collaborazione con M. Iecher, P. Pinello.
- [6] Realization of a control device for a robotic manipulator based on nonlinear decoupling and sliding mode control. "IEEE Trans. on Industrial Applications", vol. 25, num. 5, pp. 790-799, 1989. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli, P. Pinello.
- [7] Robust decoupling control of an industrial manipulator using sliding modes. "Int. J. of Robotics and Automation", vol. 3, num. 1, 1989. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [8] Design of an exact nonlinear controller for induction motors. "IEEE Trans. on Automatic Control", vol. 34, num. 12, pp. 1304-1307, 1989. In collaborazione con A. De Luca.
- [9] Inversion techniques for trajectory control of flexible arms. "J. of Robotic Systems" vol. 6, num. 4, pp. 325-344, 1989. In collaborazione con A. De Luca, P. Lucibello.
- [10] A frequency domain approach to learning control: implementation for a robot manipulator. "IEEE Trans. on Industrial Electronics" vol. 39, num. 1, pp. 1-10, 1992. In collaborazione con A. De Luca, G. Paesano.
- [11] An architecture for high performance control, using Digital Signal Processor chips. IEEE Control System Magazine, vol. 10, num. 6, pp. 20-23, 1990. In collaborazione con S. Battilotti.
- [12] Design and realization of a two-link direct drive robot with a very flexible forearm. "Int. J. of Robotics and Automation", Vol. 8, num. 3, pp. 113-128, 1993. In collaborazione con P. Lucibello.
- [13] Fuzzy Logic and Autonomous Vehicles: experiments in ultrasonic vision. "Fuzzy Sets and Systems", vol. 69, 1995, pp. 15-27. In collaborazione con M. Poloni, M. Vendittelli.

- [14] Fuzzy Maps: A New Tool for Mobile Robot Perception and Planning. *J. of Robotics Systems*, vol. 14, num. 3, pp. 179-197, 1997. In collaborazione con G. Oriolo, M. Vendittelli.
- [15] Path Planning via Skeletons on Grey Level Maps. *Intell. Automation and Soft Computing*, vol. 2, num. 4, pp. 355-374, 1996. In collaborazione con G. Oriolo, M. Vendittelli.
- [16] Repositioning Control of a Two-Link Flexible Arm by Learning, *Automatica*, vol. 33, num. 4, pp. 579-590, 1997. In collaborazione con P. Lucibello, S. Panzieri.
- [17] Real-Time Map Building and navigation for Autonomous Robots in Unknown Environments. *IEEE Trans. on System Men and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, vol. 28, num. 3, pp. 316-333, 1998. In collaborazione con G. Oriolo, M. Vendittelli.
- [18] An iterative learning controller for nonholonomic mobile robots, *Int. J. of Robotics Research*, vol. 17, num. 9, pp. 954-969, 1998. In collaborazione con G. Oriolo, S. Panzieri.

#### **Articoli su rivista con referee nazionale**

- [19] Simplified approach for the in-line optimal control of induction motor drives. "Ricerche di Automatica", vol. 12, num. 2, 1981. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.

#### **Capitoli di Libri**

- [20] Fuzzy Maps: Managing Uncertainty in Sensor-Based Motion Planning, in *Applications of Fuzzy Logic: Towards High Machine Intelligence Quotient Systems*, M. Jamshidi et al. (Ed.), chapter 9, pp. 175-200, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1997. In collaborazione con G. Oriolo, M. Vendittelli.
- [21] Fuzzy Logic Applications in Mobile Robotics. in *Fuzzy Algorithms for Control*, H. B. Verbruggen et al. (Ed.), chapter 11, pp. 301-322, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, ISBN 0-7923-8461-X, February 1999. In collaborazione con A. Ollero, F. Cuesta.
- [22] On Fuzzy Logic Control of Mobile Robots, in *Fuzzy Logic Control { Advances in Methodologies*, C. Bonivento et al., (Eds.), World Scientific, Singapore, 1998.

#### **Articoli in Congressi Internazionali con referee**

- [23] Improved commutating circuit for a modified McMurray inverter. 3rd Conference on Power Electronics, Zagabria 1978. In collaborazione con A. Bellini.
- [24] A medium power transistor inverter for variable frequency drives. First European Power Conversion Conference, Monaco 1979. In collaborazione con A. Bellini.
- [25] Realization of a bilinear observer of the induction machine. 2nd Int. Conf. on Electrical Variable-Speed Drives, London, 1979. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [26] Digital simulation of an a.c. supplied traction drive with frequency controlled induction motors. 4th Power Electronics Conf., Budapest, 1981. In collaborazione con A. Bellini, A. De Carli, G. Figalli.

- [27] An approach for the implementation on a microcomputer of the control circuit of variable frequency three-phase inverters. Annual Meeting of the IEEE Industry Appl. Soc., Philadelphia, 1981. In collaborazione con A. Bellini, C. Del Mastro, G. Figalli.
- [28] Realization on a microcomputer of an inverter control device for high power induction motor drives. 7th IEEE-IECI Int. Conf. on Applications of Mini and Microcomputers, San Francisco, 1981. In collaborazione con A. Bellini, C. Del Mastro, G. Figalli.
- [29] A simulation method for the control systems including microcomputers. Int. Symposium on Applied Modelling and Simulation, Paris, 1982. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [30] State feedback control of a.c. drives. ETG/GMR Conf. on Microelectronics in Power Electronics and Controlled Electrical Drives, Darmstadt, 1982. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [31] A three-phase modulation technique suitable to supply induction motors. IPEC-YIEE/1983, Int. Power Electronics Conf., Tokyo, 1983. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [32] Comparison among various approaches for the optimal feedback control of induction motor drives. 3rd IFAC Symposium on Control in Power Electronics and Electrical Drives, Lausanne, 1983. In collaborazione con M. La Cava, L. Tomasi, G. Figalli.
- [33] A microcomputer-based control system for an inverter supplying state feedback controlled induction motors. 3rd IFAC Symposium on Control in Power Electronics and Electrical Drives, Lausanne, 1983. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [34] A modulation technique for field-controlled induction motors easy to be implemented on a microcomputer. IEEE-IECON, Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Tokyo, 1984. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [35] A microcomputer-based optimal control system to reduce the effects of parametric variations and speed measurement errors in induction motor drives. IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting, Chicago 1984. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [36] Application of pulse-ratio-modulation to fixed frequency sinusoidal tracking inverters. 16th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf., Toulouse, 1985. In collaborazione con A. Bellini, A. De Santis, G. Figalli.
- [37] A microprocessor-based state observer for the feedback control of induction motor drives. 1st European Conf. on Power Electronics and Applications, Brussels, 1985. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [38] Design procedure of optimum PWM voltage for induction motors supply. Int. Conf. on Evolution and Modern Aspects of Induction Machines, Torino, 1986. In collaborazione con A. Bellini, A. De Carli, G. Figalli.
- [39] A microcomputer based direct field oriented control of induction motors. Int. Conf. on Electrical Machines, Munchen, 1986. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.

- [40] An interface system between an industrial robot and a multimicro process computer. Int. Conf. on Robotics, 1987 Dubrovnik. In collaborazione con M.Iecher, P.Pinello.
- [41] Realization of a control device for a robotic manipulator based on nonlinear decoupling and sliding mode control. 1987 IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting, Atlanta 1987. In collaborazione con A.Bellini, G.Figalli, P.Pinello.
- [42] Design procedure of PWM voltage in induction motor drives. IFAC 10th Triennial World Congress, Munchen, Luglio 1987. In collaborazione con A.Bellini, A.DeCarli, G.Figalli.
- [43] Robust decoupling control of an industrial manipulator using sliding modes. IEEE International Workshop on Robotics: Trends, Technology and Applications, Madrid, Ottobre 1987. In collaborazione con A.Bellini, G.Figalli.
- [44] Full linearization of induction motors via nonlinear state-feedback. 26th IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 1765-1770, Los Angeles, Dicembre 1987. In collaborazione con A.De Luca.
- [45] Dynamic decoupling of voltage frequency controlled induction motors. 8th INRIA { Int. Conf. on Analysis and Optimization of Systems, pp. 127-137, Antibes, Giugno 1988. In collaborazione con A.De Luca.
- [46] Robust hybrid dynamic control of robot arms. 28th IEEE Conf. on Decision and Control, Tampa, FL, pp. 2641-2646, Dicembre 1989. In collaborazione con A.De Luca, C.Manes.
- [47] Inversion techniques for open and closed-loop control of °exible arms. 2nd Int. Symp. on Robotics and Manufacturing, Albuquerque, Novembre 1988. In collaborazione con A.De Luca, P.Lucibello.
- [48] Software environment for robot control algorithms experimentation. IFAC Symposium on trends in control and measurement education, Swansea, UK, Luglio 1988. In collaborazione con F.Nicolò, I.Korosi, P.Pinello, K.Tihanyi.
- [49] The design of linearizing outputs for induction motors. IFAC Symposium on Nonlinear System Design, Capri, Giugno 1989. In collaborazione con A.De Luca.
- [50] A multimicro system for high performance control applications. IECON '89, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Soc., Philadelphia, Novembre 1989. In collaborazione con S. Battilotti.
- [51] An optical angular transducer for °exible robot arms. IFAC LCA, Symposium on Low Cost Automation Components, Instruments Techniques and Applications, Milano, Novembre 1989. In collaborazione con P. Lucibello.
- [52] A frequency domain approach to learning control: implementation for a robot manipulator. IEEE Int. Symp. on Intelligent Control 1989, Albany, Settembre 1989. In collaborazione con A. De Luca, G. Paesano.
- [53] Sliding mode control of a direct drive robot. IEEE 24th Industry Application Annual Meeting, San Diego, Ottobre 1989. In collaborazione con A. Bellini, G. Figalli.
- [54] Exact modelling of the °exible slewing link. IEEE Conference on Robotics and Automation, Maggio 1990, Cincinnati OH, USA. In collaborazione con F. Bellezza, L. Lanari.

- [55] Output regulation of a flexible robot arm. 9th INRIA Int. Conf. on Analysis and Optimization of Systems, Antibes, France, Giugno 1990. In collaborazione con A. De Luca, L. Lanari.
- [56] Nonlinear regulation of end-effector motion for a flexible robot arm. in *New Trends in Systems Theory*, G. Conte, A.M. Perdon, B. Wyman, Eds., *Progress in Systems and Control Theory Series*, vol. 7, pp. 229-236, Birkhauser, Boston, 1991. In collaborazione con A. De Luca, L. Lanari.
- [57] End-effector trajectory tracking in flexible arms: Comparison of approaches based on regulation theory. In *Advanced Robot Control*, C. Canudas de Wit, Ed., *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, vol.162, pp. 190-206, Springer-Verlag, Berlin, 1991. In collaborazione con A. De Luca, L. Lanari.
- [58] Control experiments on a two link robot with a flexible forearm, 29th. IEEE Conf. on Decision and Control, Honolulu, USA, pp. 520-527, Dicembre 1990. In collaborazione con A. De Luca, L. Lanari, P. Lucibello, S. Panzieri.
- [59] Iterative trajectory tracking for flexible arms with approximate models. IEEE 5th Int. Conf. on Advanced Robotics, '91 ICAR, Pisa, Giugno 91. In collaborazione con M.Poloni.
- [60] Iterative learning control of a one link flexible manipulator. IFAC Symp. on Robot Control, SYROCO '91, Vienna, Austria, Settembre 91. In collaborazione con M.Poloni.
- [61] Iterative Learning Control of Robots with Elastic Joints. 1992 IEEE Conf. on Robotics and Automation, Nizza, FR, Maggio 1992. In collaborazione con A. De Luca.
- [62] Implementation of a Hybrid Force-Position Controller using Sliding Mode Techniques. 1992 IEEE Conf. on Robotics and Automation, Nizza, FR, Maggio 1992. In collaborazione con A. Fedele, A. Fioretti.
- [63] End-Point Control of a Flexible Structure using Acceleration and Displacement Feedback. 12th International Seminar on Modal Analysis and Structural Dynamics, Leuven, Belgio, Settembre 1992. In collaborazione con D. Del Vecovo, W. D'Ambrogio. .
- [64] Comparison of Equation Based Fuzzy Controllers. IFAC Workshop on Motion Control, Perugia, I, Ottobre 1992.
- [65] On Line Processing of Position and Force Measures for Contour Identification and Robot Control. 1993 IEEE Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, Georgia, Maggio 1993. In collaborazione con A. Fedele, A. Fioretti, C. Manes.
- [66] Design and Implementation of State-Space Observers for Flexible Robots. 1993 IEEE Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, Georgia, Maggio 1993. In collaborazione con S. Panzieri.
- [67] Neural Modeling of a Flexible Link. IFAC/IMACS 2nd Int. Symp. on mathematical and Intelligent Models in System Simulation, Brussels, Belgio, pp. 79-83, Aprile 1993. In collaborazione con S. Panzieri.

- [68] Point to Point Learning Control of a Two Link Flexible Arm. 3rd Int. Symp. on Experimental Robotics, Kyoto, Jp, Oct. 28-30, 1993 and in Lecture Notes in Control and Information Science: Experimental Robotic III, Springer-Verlag, Berlin, 1994. In collaborazione con P. Lucibello, S. Panzieri.
- [69] Implementation of a Tracking Learning Controller for an Industrial Manipulator. 2nd IEEE Conf on Control Applications, Vancouver, CA, Sept. 13-16, 1993. In collaborazione con A. Carozzi, A. Fioretti, M. Poloni, F. Nicolp.
- [70] Experiments in Robotic Deburring with On-line Surface Identification. 2nd Mediterranean Symp. on New Directions in Control and Automation, Chania, GR, 19-22 Giugno 1994. In collaborazione con A. Fedele, A. Fioretti.
- [71] Experiments on repositioning learning control of a °exible link under gravity. IFAC Symp. on Robot Control, SYROCO 94, Capri, I, 19-21 Settembre 1994. In collaborazione con P. Lucibello, S. Panzieri.
- [72] Motion Planning with Uncertainty: Navigation on Fuzzy Maps. IFAC Symp. on Robot Control, SYROCO 94, Capri, I, 19-21 Settembre 1994. In collaborazione con G. Oriolo, M. Vendittelli.
- [73] The Transferable Belief Model in Ultrasonic Map Building. 6th IEEE Conf. on Fuzzy Syst., Barcellona, E, July 1-5, 1997, pp. 601-606. In collaborazione con F. Gambino, M. Vendittelli.
- [74] A comparison of three uncertainty calculus techniques for ultrasonic map building. SPIE 1996 Int. Symp. on Aerospace-Defence Sensing and Control, Orlando, Fl, pp.249-260, 8-12 April, 1996. In collaborazione con F. Gambino, G. Oriolo.
- [75] Potential Based Motion Planning on Fuzzy Maps. 2nd European Congress on Fuzzy and Intelligent technologies, EUFIT '94, Aachen, Germany, pp. 731-735, Sept 20-23, 1994. In collaborazione con G. Oriolo, M. Vendittelli.
- [76] Path Planning via Skeletons on Grey Level Maps. 3rd Mediterranean Symp. on New Directions in Control and Automation, Limassol, Cyprus, pp. 307-314, July 11-13, 1995. In collaborazione con G. Oriolo, M. Vendittelli.
- [77] On-line Map Building and Navigation for Autonomous Mobile Robots. Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nagoya, Jp, pp. 2900-2906, May 21-27, 1995. In collaborazione con G. Oriolo, M. Vendittelli.
- [78] A Mobile Robot Localization Method for Incremental Map Building and Navigation, 3rd Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems '95, Pisa, I, pp. 57-65, July 10-14, 1995. In collaborazione con G. Fortarezza, G. Oriolo, M. Vendittelli.
- [79] Disturbance Rejection of Iterative Learning Control applied to trajectory tracking for a °exible manipulator. 1995 ECC, European Control Conference, Rome, I, Sept. 5-8, 1995. In collaborazione con S. Panzieri.
- [80] Fuzzy Logic in the Design of the Navigation System of a Wheelchair for Disabled People. in New Trends in Fuzzy logic, Proceedings of the WILF '95, Bonarini A. et al. (Eds.), World Scienti c, pag. 122-132, Singapore, 1996
- [81] Emergent Techniques for Mobile Robots and Autonomous Vehicles. Invited Keynote in IFAC workshop ICASAV'95, Toulouse, Oct 25-26, 1995.

- [82] Cyclic Learning Control of Chained-Form Systems with Application to the Car-Like Robot. 13th IFAC World Congr., S. Francisco, Ca, vol. A, pp. 187-192, July 1-5, 1996. In collaborazione con G. Oriolo, S. Panzieri.
- [83] An Iterative Learning Controller for Nonholonomic Robots. 1996 IEEE Conf. on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, pp. 2676-2681, April 22-28, 1996. In collaborazione con G. Oriolo, S. Panzieri.
- [84] The Fuzzy Horizons Obstacle Avoidance Method for Mobile Robots. World Automation Conf. - ISRAM'96, Montpellier, Fr, May 27-30, 1996. In collaborazione con M. Balzarotti.
- [85] Finite-Dimensional Optimal Learning Control: Application to a Flexible Link. Proc. of the 4th IEEE Mediterranean Symp. on New Directions in Control and Automation, Maleme, Gr, pp. 687-692, June 10-13, 1996. In collaborazione con G. Oriolo, S. Panzieri.
- [86] Learning Nice Robust Trajectories for a Car-Like Robot. Int. Symp. on Intell. Robotic Systems '96, Lisbon, PT, pp. 123-130, July 22-26, 1996. In collaborazione con E. Ferretti, G. Oriolo, S. Panzieri.
- [87] Enhanced uncertainty modeling for robot localization, 7th Int. Symp. on Robotics with Applications (ISORA'98), Anchorage, AL, 1998. In collaborazione con E. Fabrizi, G. Oriolo, S. Panzieri.
- [88] Stable inversion control for flexible link manipulators, 1998 IEEE Conf in Robotics and Automation, Leuven, Belgium, pp. 799-805, May 16-20, 1998. In collaborazione con A. De Luca, S. Panzieri.
- [89] A KF-based localization algorithm for nonholonomic mobile robots, 6th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Alghero, I, 1998. In collaborazione con E. Fabrizi, S. Panzieri.
- [90] Position Estimation for a Low Cost Wheelchair Prototype with a Sonar System, IARP, International Advanced Robotics Programme, Genova 23-24 Ottobre 1997. In collaborazione con M. Caravassilis.
- [91] Sensor Fusion for a Mobile Robot with Ultrasonic and Laser Ranges, 3rd IFAC Symp. on Intell. Components and Instruments for Control Appl., Annecy, France, June 9-11 1997. In collaborazione con E. Fabrizi.
- [92] Learning Optimal Trajectories for Nonholonomic Systems, Iterative Learning Control Workshop, Tampa, FL, Dicembre 1998. In collaborazione con G. Oriolo, S. Panzieri.

### **Articoli in Congressi Nazionali**

- [93] La ricerca sperimentale in robotica presso il DIS. IV congresso nazionale SIRI, Milano, Marzo 1988. In collaborazione con F. Nicolò.
- [94] Trajectory Tracking in Flexible Robot Arms. System, Models and Feedback: Theory and Applications, Capri, IT, Giugno 1992. In collaborazione con A. De Luca, F. Nicolò.
- [95] Sonar Scene Reconstruction using Fuzzy Logic. Automation 92 - 36th ANIPLA Conference, Genova, I, 16-18 Novembre 1992. In collaborazione con M. Poloni, M. Vendittelli.

## **Publicazioni non ancora disponibili**

### Accettate

- [96] Accurate Map Building via Fusion of Laser and Ultrasonic Range Measures. in Fuzzy Logic Techniques for Autonomous Vehicle Navigation, A. Saffioti e D. Driankov (Eds.), In collaborazione con G. Oriolo, E. Fabrizi.
- [97] "An integrated sensing-guidance system for a robotized wheelchair", to appear in 14th IFAC World Congress, July 4-9, 1999, Beijing, China. In collaborazione con E. Fabrizi, S. Panzieri.

### Submitted

- [98] Learning Optimal Trajectories for Nonholonomic Systems. Submitted for publication in the International Journal of Control Special issue on Iterative Learning Control In collaborazione con G. Oriolo, S. Panzieri.