CURRICULUM VITAE DI

FABRIZIO CACCAVALE

FABRIZIO CACCAVALE

Via Ferrarecce, n. 75
81100 Caserta
Tel: 0823 279461
E-mail: caccaval@unina.it
C.F.: CCCFRZ65S14F839K

Profilo biografico

Fabrizio Caccavale è nato a Napoli il 14 novembre 1965. Ha conseguito la *Laurea* in Ingegneria Elettronica nel 1993 e il titolo di *Dottore in Ricerca* nel 1997, entrambi presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II. Dal 1993 svolge la sua attività presso il Dipartimento di Informatica e Sistemistica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli Federico II, dove dal novembre 1999 è *Ricercatore* nel settore ING-INF/04 (Automatica). Nel Gennaio 2001 consegue l'*idoneità* a Professore Associato. Dall'aprile all'ottobre 1996 è stato *Visiting Scholar* presso il *Department of Electrical and Computer Engineering*, *Rice University* (Houston, Texas). I suoi interessi di ricerca riguardano l'identificazione dinamica di manipolatori, il controllo cinematico di robot, la modellistica e il controllo di sistemi di manipolazione a robot cooperanti, il controllo d'impedenza di robot, la diagnosi dei guasti in sistemi dinamici ed il controllo non lineare di sistemi meccanici. È stato titolare di insegnamenti per corsi di Diploma Universitario e Laurea. Ha tenuto seminari e presentazioni presso istituzioni italiane ed estere. È stato revisore per le maggiori riviste nel settore dell'Automatica e per numerosi congressi. È coautore di 16 articoli scientifici pubblicati o in corso di pubblicazione su riviste a diffusione internazionale, 1 articolo pubblicato su riviste a diffusione nazionale, 36 articoli pubblicati o in corso di pubblicazione in atti di convegni a carattere internazionale e capitoli di libri a diffusione internazionale, 3 articoli pubblicati o in corso di pubblicazione in atti di convegni a carattere nazionale.

Istruzione universitaria

1993 Consegue la Laurea in *Ingegneria Elettronica* con voti 110/110 con lode, presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, discutendo la tesi dal titolo: " Esperienze di controllo nello spazio operativo sul robot industriale Comau Smart 6.12" (relatore: Prof. Lorenzo Sciavicco)

1994 Consegue l'abilitazione alla professione di Ingegnere

1993–1996 Allievo del IX ciclo del *Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica e Informatica*, con sede amministrativa presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II (curriculum in Automatica, tutore: Prof. Lorenzo Sciavicco)

1997 Consegue il titolo di *Dottore di Ricerca in Ingegneria Elettronica ed Informatica*, discutendo la tesi dal titolo: "Modellistica e controllo di manipolatori cooperanti: teoria ed esperimenti"

1998–1999 Fruisce di una borsa di studio per attività di ricerca *Post-Dottorato* presso il Dipartimento di Informatica e Sistemistica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli Federico II

Servizi prestati presso istituzioni universitarie italiane

1996–1997 *Professore a contratto* di *Controlli Automatici*, Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica ed Automatica, Università degli Studi di Napoli Federico II

Tutore presso il Polo Tecnologico di Napoli per il Consorzio Nettuno (progetto Teleuniversità); modulo di *Controllo dei Processi*, Diploma Universitario in Ingegneria Informatica

1997–1998 *Professore a contratto* di *Controlli Automatici*, Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica ed Automatica, Università degli Studi di Napoli Federico II

Tutore presso il Polo Tecnologico di Napoli per il Consorzio Nettuno (progetto Teleuniversità); modulo di *Controllo dei Processi*, Diploma Universitario in Ingegneria Informatica

1999-pres. *Professore supplente* di *Controlli Automatici*, Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi della Basilicata, Potenza

Tutore presso il Polo Tecnologico di Napoli per il Consorzio Nettuno (progetto Teleuniversità); modulo di *Controlli Automatici*, Diploma Universitario in Ingegneria Informatica

2000-pres. *Professore supplente* di *Automazione Industriale*, Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale, Università degli Studi di Napoli Federico II

Servizi di ruolo universitario

1999-pres. *Ricercatore Universitario* nel settore scientifico-disciplinare ING-INF/04 (Automatica) presso la Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Napoli Federico II, affiliato al Dipartimento di Informatica e Sistemistica

Servizi prestati presso istituzioni universitarie straniere

1996 *Visiting Scholar* presso la *Rice University* di Houston, Texas (nel periodo da Aprile a Ottobre)

Partecipazioni ad organi accademici

1994–1996 Rappresentante degli studenti di dottorato nel Consiglio del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II

Altri titoli

2001 Consegue l'*idoneità* a Professore Associato (Gennaio).

Attività didattica

Insegnamenti tenuti presso istituzioni universitarie

1996-1997 *Controlli Automatici*, Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica ed Automatica, Università degli Studi di Napoli Federico II

1997-1998 *Controlli Automatici*, Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica ed Automatica, Università degli Studi di Napoli Federico II

1999-pres. *Controlli Automatici*, Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi della Basilicata, Potenza

2000-pres. *Automazione Industriale*, Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale, Università degli Studi di Napoli Federico II

Assistenza didattica presso istituzioni universitarie

1996-pres. *Robotica Industriale*, Corsi di Laurea in Ingegneria Elettronica, Ingegneria Informatica, Ingegneria Meccanica e Ingegneria Gestionale, Università degli Studi di Napoli Federico II (titolare: Prof. Bruno Siciliano)

1999-pres. *Controlli Automatici*, Corsi di Laurea in Ingegneria Elettronica e Ingegneria Informatica, Università degli Studi di Napoli Federico II (titolare: Prof. Lorenzo Sciavicco)

1999-2000 *Teoria dei Sistemi*, Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale, Università degli Studi di Napoli Federico II (titolare: Prof. Bruno Siciliano)

1999-2000 *Automazione Industriale*, Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale, Università degli Studi di Napoli Federico II (titolare: Prof. Francesco Garofalo)

Corsi e seminari tenuti presso università ed enti di formazione

1995 Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Salerno
ciclo di seminari di Controlli Automatici

1997 *1^{o} Master in Tecnologie Avanzate dell'Informazione e della Comunicazione*, Istituto Internazionale per gli Alti Studi Scientifici E.R. Caianiello, Vietri sul Mare (SA)
ciclo di lezioni: "Automazione Industriale"

1998	Facoltà di Ingegneria della Seconda Università di Napoli ciclo di seminari: "Robotica Industriale: cinematica, dinamica e pianificazione del moto"
2000	Convenzione didattica stipulata tra il Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell' Università di Napoli e la 3F Data System per interventi formativi nell'ambito del progetto *IT.CAMP: Formazione di tecnici ricercatori nelle tecnologie dell'informazione* lezioni nell'ambito del modulo di "Controllo logico-sequenziale"

Resoconto dell'attività didattica

In una prima fase lo svolgimento dell'attività didattica è avvenuto prevalentemente in qualità di supervisore e correlatore di numerose tesi di laurea su temi di identificazione di manipolatori robotici, controllo cinematico di robot industriali, sistemi di manipolazione a bracci cooperanti, manipolatori spaziali.

Dal 1994 ha contribuito alla realizzazione del Laboratorio PRISMA (Progetti di Robotica Industriale Servo-Meccanismi e Automazione), curando in particolare l'installazione sperimentale per la manipolazione cooperante ed il controllo dell'interazione, costituita da due robot industriali dotati di sensori di forza/coppia al polso. Ha inoltre curato lo svolgimento di esercitazioni svolte presso il Laboratorio PRISMA nell'ambito dei corsi di Controlli Automatici, Robotica Industriale e Ingegneria e Tecnologia dei Sistemi di Controllo per gli allievi dei corsi di Laurea in Ingegneria Elettronica, Informatica, Meccanica, Gestionale, e nell'ambito dei corsi di Controlli Automatici per gli allievi del Diploma Universitario in Ingegneria Informatica ed Automatica.

Negli anni accademici 1996/1997 e 1997/1998 ha tenuto, in qualità di professore a contratto, l'insegnamento di *Controlli Automatici* per il Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica ed Automatica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, preparando e svolgendo le lezioni e le esercitazioni previste, presiedendo le relative commissioni di esame e svolgendo compiti di assistenza didattica agli allievi.

Dal 1996 al 1999 è tutore presso il Polo Tecnologico di Napoli per il Consorzio Nettuno (progetto Teleuniversità) per il modulo di *Controllo dei Processi*, e dall'anno accademico 1999/2000 per il modulo di *Controlli Automatici* (Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica ed Automatica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II).

Dal novembre 1996 presta assistenza didattica per il corso di*Robotica Industriale* per i Corsi di Laurea in Ingegneria Elettronica, Ingegneria Informatica, Ingegneria Meccanica e Ingegneria Gestionale, tenuto dal Prof. Bruno Siciliano, svolgendo attività seminariale e, successivamente, curando lo sviluppo di lezioni ed esercitazioni.

Dal novembre 1999 al novembre 2000 presta assistenza didattica per il corso di *Teoria dei Sistemi* per il Corso di Laurea in Ingegneria Aeronautica, tenuto dal Prof. Bruno Siciliano, curando lo sviluppo di lezioni ed esercitazioni.

Dal novembre 1999 al novembre 2000 presta assistenza didattica per il corso di *Automazione Industriale* per il Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale, tenuto dal Prof. Francesco Garofalo, curando le lezioni e le esercitazioni relative al controllo logico-sequenziale degli impianti di produzione. È stato membro della relativa commissione d'esame. Dall'anno accademico 2000/2001 è titolare per supplenza del suddetto corso.

Dal novembre 1999 collabora allo svolgimento del Corso di *Controlli Automatici* tenuto dal Prof. Lorenzo Sciavicco nell'ambito del Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, curando il corso di esercitazioni e svolgendo compiti di assistenza didattica agli studenti. È membro della relativa commissione d'esame.

Dall'anno accademico 1999/2000 è titolare per supplenza del corso di *Controlli Automatici* per il Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi della Basilicata (Potenza).

Da annoverare nel quadro degli impegni didattici è l'attività seminariale svolta presso istituzioni universitarie ed enti di formazione. Tra questi, si segnala il ciclo di seminari su temi di Controlli Automatici tenuto presso l'Università degli Studi di Salerno per gli allievi del Diploma Universitario in Ingegneria Elettronica, ed il ciclo di seminari tenuto presso la Facoltà di Ingegneria della Seconda Università di Napoli su temi di Robotica Industriale.

Dal 1993 ad oggi, è stato correlatore di numerose tesi di laurea su temi di tecniche di identificazione dinamica di manipolatori, controllo cinematico di robot industriali, sistemi di manipolazione a bracci cooperanti, controllo dell'interazione di manipolatori, controllo di robot spaziali, diagnosi dei guasti in sistemi robotici, modellistica ed identificazione di oggetti flessibili per la manipolazione cooperante, controllo dei robot con tolleranza ai guasti. È inoltre stato correlatore di tesi di laurea e di diploma universitario su temi di Automazione Industriale e controllo logico-sequenziale.

Attività scientifica

Partecipazione a progetti e programmi di ricerca

1994–1996 Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per "European Robotics Network" nell'ambito di Human Capital and Mobility Programme finanziato da *European Commission*

1995–1996 Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Progetto Nazionale di Ricerca ex 40% "Sistemi di Controllo per Robot Operanti in Spazi Strutturati e non Strutturati" finanziato da *MURST*

1995–1997 Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Progetto di Ricerca Fondamentale "Modellistica e Controllo di Manipolatori Spaziali Flessibili" finanziato da *ASI*

1997 Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Progetto di Ricerca Coordinato "Manipolazione Robotica: Cooperazione e Destrezza" finanziato da *CNR*

1998–1999 Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Programma di Ricerca di Interesse Nazionale "RAMSETE: Robotica Articolata e Mobile per i SErvizi e le TEconologie" co-finanziato da *MURST*

1999-pres. Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Progetto di Ricerca Fondamentale "Sviluppo di un test-bed per la manipolazione robotica in ambiente spaziale" finanziato da *ASI*

Collaborazioni di ricerca con istituzioni universitarie

1995 Controllo ibrido di manipolatori cooperanti
Laboratoire de Robotique de Paris, Parigi, Francia

1996–1999 Rilevazione guasti in sistemi robotici
Rice University, *Department of Electrical and Computer Engineering*, Houston, Texas

1997 Controllo cinematico per il coordinamento del moto di manipolatori cooperanti
Poznań University of Technology, Chair of Control, Robotics, and Computer Science, Poznań, Polonia

1999–pres. Diagnosi dei guasti e controllo fault tolerant dei sistemi robotici
Clemson University, *Department of Electrical and Computer Engineering*, Clemson, South Carolina

Seminari tenuti presso istituzioni universitarie ed enti di ricerca

1995 *University of California at Irvine* (USA)
seminario dal titolo: "PD-type control schemes for cooperative manipulator systems"

Partecipazione e collaborazione ad associazioni scientifiche

1995 Membro *ANIPLA*

1995–1998 *IEEE Student Member*

Collaborazione con riviste e convegni

1993–pres. Revisore scientifico per:
ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control
Automatica
IEEE Transactions on Automatic Control
IEEE Transactions on Robotics and Automation
Journal of Robotic Systems

1993–pres. Revisore scientifico per numerosi convegni internazionali

Inquadramento dell'attività scientifica

L'attività scientifica è stata incentrata su aspetti metodologici e applicativi della ricerca nell'area del controllo dei manipolatori robotici e dei sistemi meccanici. I temi di ricerca affrontati spaziano dal problema dell'identificazione dinamica di manipolatori robotici, al controllo di sistemi a bracci cooperanti ed alle tecniche di rilevazione guasti nei sistemi dinamici. Le metodologie utilizzate includono tecniche di stima, metodologie di analisi e sintesi alla Lyapunov, controllo con reazione dello stato stimato, osservatori diagnostici per sistemi non lineari. L'intensa attività sperimentale che ha costantemente affiancato l'investigazione metodologica, risulta essere un elemento caratterizzante del cammino di ricerca perseguito; infatti, l'attività di laboratorio ha rappresentato un importante momento di validazione delle metodologie sviluppate e, allo stesso tempo, ha continuamente stimolato nuovi orientamenti e percorsi di investigazione. Lo svolgimento dell'attività scientifica ha avuto luogo in seno al gruppo di Automatica presso il Dipartimento di Informatica e Sistemistica della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, ad eccezione di un periodo di sei mesi trascorso negli Stati Uniti presso il *Department of Electrical and Computer Engineering* della *Rice University*, Houston, Texas (Aprile-Ottobre 1996).

Resoconto dell'attività scientifica

L'attività scientifica svolta dal 1993 ad oggi è incentrata sui temi elencati di seguito:
- identificazione dinamica di manipolatori robotici;
- controllo cinematico di manipolatori robotici;
- controllo di sistemi di manipolatori cooperanti;
- controllo d'impedenza di robot interagenti con l'ambiente;
- diagnosi dei guasti e controllo fault tolerant dei sistemi robotici;
- controllo non lineare di sistemi meccanici.

Nella presentazione che segue i temi di ricerca sopra elencati sono brevemente discussi, evidenziando le motivazioni che hanno stimolato la ricerca in determinate aree ed i contributi originali apportati. I riferimenti alle pubblicazioni sono effettuati tramite le sigle utilizzate nella lista riportata successivamente in questo documento. I riferimenti alle 10 pubblicazioni ritenute più significative sono evidenziati in grassetto.

• *Identificazione dinamica di manipolatori robotici*

La struttura del modello dinamico di un robot manipolatore è ricavabile applicando le metodologie tipiche della meccanica (equazioni di Lagrange, formulazione di Newton-Eulero); tuttavia, i parametri che compaiono nelle equazioni del moto non sempre sono noti con sufficiente accuratezza. Pertanto, è spesso opportuno procedere alla identificazione dei parametri di modello per l'utilizzo in schemi di controllo con compensazione della dinamica [**RI1**],[CI1].

Diverse classi di algoritmi di stima dei parametri sono state sperimentate su manipolatori industriali di tipo convenzionale [**RI1**],[CI2,CI3]. Nonostante le condizioni degli esperimenti effettuati fossero lontane da quelle ideali, i risultati hanno evidenziato una elevata accuratezza della stima. Successivamente, sono state sviluppate e sperimentate tecniche per la determinazione delle traiettorie ottime per la stima parametrica e tecniche di riduzione del carico computazionale associato al modello identificato [**RI8**],[CI12],[CN1]. Infine, è stata definita in [**RI8**],[CN2] una procedura sistematica per la modellazione dinamica, la riduzione di modello, il progetto degli esperimenti di identificazione e la stima dei parametri; tale procedura rappresenta uno strumento completo per la modellazione e l'identificazione di manipolatori robotici, e risulta agevolmente automatizzabile mediante procedure software.

• *Controllo cinematico di manipolatori robotici*

L'approccio noto come *controllo cinematico* dei manipolatori robotici si basa su una strategia a due stadi: nel primo stadio viene risolta la cinematica inversa per generare i riferimenti di moto ai giunti del manipolatore, mentre il secondo stadio è costituito dagli anelli di controllo del moto dei giunti. La soluzione della cinematica inversa può essere affidata ad algoritmi di inversione a ciclo chiuso (algoritmi *CLIK*: Closed Loop Inverse Kinematics) che assicurano ottime prestazioni in termini di convergenza e robustezza numerica, e permettono un razionale impiego della ridondanza cinematica.

L'attività di ricerca su tali temi è stata inizialmente dedicata alla sperimentazione di schemi di controllo cinematico su un manipolatore industriale ridondante a sette gradi di mobilità [RI2],[CI4]. Successivamente, è stata studiata la stabilità di una classe di algoritmi *CLIK* con robustezza alle singolarità cinematiche mediante il metodo di Lyapunov [**RI3**], ricavando un insieme di condizioni sufficienti che assicurano la limitatezza dell'errore di inversione. Le prestazioni di uno schema di controllo cinematico basato su tali algoritmi sono state verificate sperimentalmente su un robot industriale a sei gradi di mobilità [**RI3**],[CI7].

Infine, è stata messa a punto e sperimentata una strategia di controllo cinematico per il moto coordinato di sistemi robotici costituiti da più manipolatori [T1],[CI11], successivamente riformulata mediante il formalismo dell'algebra spaziale [CI17], che permette di definire algoritmi di inversione cinematica con struttura intrinsecamente ricorsiva e modulare.

Recentemente, alcune tecniche di inversione cinematica per strutture ridondanti sono state estese al caso di manipolatori con base flottante [RS3],[CI33]. L'interesse per tali tematiche scaturisce dal loro notevole potenziale applicativo nel settore delle missioni spaziali, dove l'utilizzo di sistemi robotici permette di ridurre rischi e costi di operazioni di installazione e manutenzione di apparati satellitari e stazioni orbitanti.

- *Controllo di sistemi di manipolatori cooperanti*

L'interesse per tale tematica di ricerca scaturisce dalla necessità di migliorare la capacità di carico e di manipolazione di un sistema robotico, mediante l'uso coordinato di più unità robotiche per la manipolazione di un'oggetto comune. Questo argomento è stato oggetto della dissertazione finale per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca [T1].

In una prima fase è stata messa a punto una installazione sperimentale per la manipolazione cooperante da utilizzare come piattaforma per la sperimentazione di algoritmi di controllo avanzati. L'installazione risulta essere cinematicamente ridondante, ed è costituita da due manipolatori industriali COMAU SMART-3 S equipaggiati con un controllore ad architettura aperta e sensori di forza/coppia al polso [T1],[RI11],[RN1].

Nel caso di manipolazione cooperante di un oggetto rigido in presa rigida, l'obiettivo principale del controllo consiste nel garantire il posizionamento dell'oggetto rispetto ad una terna coordinata di riferimento e, allo stesso tempo, evitare l'insorgenza di stress meccanici applicati all'oggetto (forze interne). Nell'ambito dell'attività di ricerca svolta in collaborazione con il *Laboratoire de Robotique* *de Paris*, è stato sintetizzato uno schema di controllo *ibrido* per l'inseguimento di traiettorie di riferimento sia per le forze interne che per posizione assoluta dell'oggetto manipolato [CI5,CI6].

Un approccio alternativo è basato sul *filtraggio cinetostatico* delle componenti dell'azione di controllo che provocano forze interne a regime. Sulla base di questo approccio è stata individuata una classe di regolatori del moto ai giunti [T1], agevolmente integrabile nell'ambito di una strategia di controllo cinematico, in grado di garantire l'annullamento delle forze interne a regime; l'analisi della stabilità e delle prestazioni dello schema proposto è riportata in [T1], [**RI5**],[CI10]. Uno schema di regolazione con filtraggio cinetostatico, formulato direttamente nello spazio operativo di cooperazione, è stato inizialmente proposto in [CI8], e successivamente esteso, in [T1],[CI15], mediante l'utilizzo del quaternione unitario per la rappresentazione degli errori di orientamento; tale scelta permette di evitare l'occorrenza di singolarità di rappresentazione tipiche delle descrizioni minime dell'orientamento.

Successivamente è stata proposta e sperimentata [CI19] una nuova architettura di controllo basata su regolatori indipendenti progettati nello spazio operativo dei singoli manipolatori. Tale architettura è caratterizzata da un carico computazionale ridotto rispetto agli schemi di controllo cinematico e, allo stesso tempo, da una minore complessità rispetto agli schemi di controllo definiti nello spazio operativo di cooperazione. L'analisi dell'equilibrio e della stabilità dello schema proposto è riportata in [**RI12**],[CI25].

Recenti sviluppi hanno portato alla definizione di strategie di controllo d'impedenza per manipolatori cooperanti per il controllo dell'interazione con l'ambiente [CI27,CI28] e delle forze interne [RI14],[CI32,CI36],[CN3].

L'attività di ricerca in questo ambito è attualmente focalizzata su temi di modellistica e controllo di sistemi cooperanti per la manipolazione di oggetti flessibili, e sullo sviluppo di tecniche di controllo ad inseguimento di traiettoria con adattamento ai parametri fisici e geometrici dell'oggetto manipolato.

- *Controllo d'impedenza di robot interagenti con l'ambiente*

Obiettivo del controllo di impedenza è quello di limitare le forze e i momenti originati dall'interazione manipolatore/ambiente, conferendo all'organo terminale del manipolatore un comportamento dinamico cedevole caratterizzato da parametri di massa, smorzamento e cedevolezza assegnati (impedenza meccanica).

L'adozione dello schema classico di controllo d'impedenza su robot industriali, richiede la compensazione di fenomeni difficilmente modellabili, quali l'attrito ai giunti. In [CI9] viene proposto e sperimentato uno schema di controllo d'impedenza che presenta ottime caratteristiche di robustezza nei confronti di modellazione imperfetta del manipolatore.

Per la descrizione ed il controllo di compiti di interazione a sei gradi di libertà (caratterizzati cioè da posizione ed orientamento dell'organo terminale), vengono di solito utilizzate rappresentazioni minime dell'orientamento, che comportano l'insorgenza di problemi di singolarità di rappresentazione e non conferiscono un chiaro significato fisico ai termini nell'equazione che definisce l'impedenza. Per superare tali difficoltà è stato proposto e verificato sperimentalmente un nuovo approccio al controllo di impedenza basato su una formulazione di tipo energetico e sull'utilizzo di rappresentazioni dell'orientamento di tipo asse/angolo [**RI6**],[CI14]. L'approccio è stato successivamente generalizzato introducendo termini di accoppiamento nel termine elastico della dinamica di impedenza [**RI9**],[CI16]. Tale generalizzazione è di notevole utilità per la modellazione di ambienti cedevoli e l'esecuzione di compiti caratterizzati da geometria complessa [RI15],[CI20].

Gli attuali sforzi di ricerca nell'ambito del controllo d'impedenza sono principalmente votati alla estensione delle metodologie sopra descritte al caso di sistemi di manipolazione cooperante [RI14],[CI27,CI28,CI32,CI36],[CN3] ed ai manipolatori con struttura parallela [CI31].

• *Diagnosi dei guasti e controllo fault tolerant dei sistemi robotici*

Ai tradizionali impieghi dei manipolatori robotici negli impianti di produzione automatizzati si affianca sempre più frequentemente il loro utilizzo in ambienti inaccessibili e/o ostili ad operatori umani. Le nuove prospettive di impiego dei manipolatori hanno stimolato l'apertura di linee di ricerca tese a conferire ai sistemi robotici capacità autonome di rilevazione e identificazione di guasti (fault diagnosis), ed a garantire che gli obiettivi primari del compito pianificato siano conseguiti anche in presenza di malfunzionamenti (fault tolerance).

In questo ambito la ricerca è stata finalizzata alla definizione di tecniche di rilevamento dei guasti basate su osservatori non lineari dello stato del manipolatore. Tale attività, inizialmente svolta in collaborazione con il prof. I.D. Walker presso il *Department of Electrical and Computer Engineering* della *Rice University*, ha condotto alla definizione di un osservatore diagnostico caratterizzato da una buona robustezza alle dinamiche non modellate ed agli errori di discretizzazione [CI13],[RS2]. Successivamente è stata avviata una fase di verifica sperimentale della metodologia proposta [CI21],[RS2]; i risultati hanno confermato le previsioni teoriche circa la robustezza a fenomeni non modellati e la sensibilità ai guasti.

L'attività futura su questi temi verrà principalmente incentrata sullo sviluppo di metodologie per l'analisi delle informazioni provenienti da osservatori diagnostici (analisi dei residui) per la diagnosi completa dei guasti (istante di tempo, fonte ed entità del guasto) in presenza di incertezze di modello e di rumore di misura. Nell'ambito dei sistemi robotici fault tolerant, gli attuali sforzi di ricerca sono votati allo sviluppo di strategie di controllo cinematico per manipolatori ridondanti, in grado di garantire l'esecuzione del moto assegnato all'organo terminale e l'ottimizzazione di indici di tolleranza a guasti degli attuatori.

- *Controllo non lineare di sistemi meccanici*

Negli ultimi anni il problema del controllo del moto di sistemi meccanici articolati ha assunto una sempre maggiore rilevanza in diverse aree applicative. In generale la configurazione di tali sistemi è rappresentata da un insieme di coordinate generalizzate (coordinate di giunto, cartesiane) e da un insieme di matrici di rotazione che descrivono l'orientamento delle terne coordinate di interesse. Obiettivo del controllo è l'inseguimento di traiettorie di moto assegnate per le coordinate generalizzate e per l'orientamento delle terne coordinate.

Un primo passo per la risoluzione del problema del controllo di tali sistemi consiste nella scelta di una rappresentazione globalmente valida per l'orientamento; a tal proposito è conveniente riferirsi a rappresentazione non minime come, ad esempio, il quaternione unitario. Inoltre, gli schemi di controllo ad inseguimento di traiettoria proposti in letteratura richiedono la misura sia delle coordinate di posizione ed orientamento che delle corrispondenti velocità; nella pratica, all'indisponibilità di sensori di velocità si supplisce con l'adozione di algoritmi di differenziazione numerica delle misure; ciò spesso comporta livelli di rumore inaccettabili sui segnali di riferimento per gli attuatori. Al fine di ovviare a tali inconvenienti, in [CI23],[RS1] è stato elaborato un approccio generale al controllo del moto per tali sistemi in assenza di misure di velocità; in particolare, una legge di controllo basata sul modello dinamico viene progettata insieme con un osservatore non lineare dello stato del sistema. La stabilità del sistema a ciclo chiuso è stata dimostrata ricorrendo al metodo di Lyapunov, derivando anche un insieme di condizioni sufficienti per la convergenza esponenziale degli errori di inseguimento. La metodologia proposta è stata applicata al controllo d'assetto di veicoli spaziali [**RI10**], al controllo di sistemi veicolo-manipolatore per operazioni in ambiente sottomarino [**RI13**],[CI22,CI30] ed al controllo nello spazio operativo di manipolatori robotici [CI24].

Infine, i risultati conseguiti nell'ambito del controllo d'impedenza e del controllo dei sistemi meccanici hanno stimolato uno studio generale sull'uso del quaternione unitario nel controllo dei manipolatori [RI4,**RI7**].

Ulteriori sforzi di ricerca dovranno essere spesi nel futuro per sintetizzare leggi di controllo adattative e/o robuste rispetto ai termini dinamici incerti o soggetti a variazioni. Alcuni risultati per il caso di sistemi sottomarini sono stati presentati in [RS3],[CI26,CI35], dove viene proposta ed analizzata una legge di controllo con struttura modulare, ed in [CI34],[CS1], dove i termini di compensazione di alcuni fenomeni (gravità, galleggiamento e correnti marine) contribuiscono all'azione di controllo in maniera differenziata.

Pubblicazioni

L'elenco di seguito riportato riguarda i lavori scientifici pubblicati o in corso di pubblicazione, nonchè gli articoli sottomessi per la pubblicazione.

A ciascuna pubblicazione è associato un codice identificativo che ne identifica la posizione nell'elenco: T: elaborati di tesi, RI: riviste a diffusione internazionale, RN: riviste a diffusione nazionale, CI: congressi a carattere internazionale (CL: capitoli di libri a diffusione internazionale), WI: workshops a carattere internazionale, CN: congressi a carattere nazionale, RS: articoli sottomessi per la pubblicazione su riviste, CS: articoli sottomessi per la pubblicazione in atti di congressi. Per ogni lavoro viene indicato anche il luogo e la data di pubblicazione.

Il codice identificativo relativo alle 10 pubblicazioni ritenute più significative è riportato in grassetto.

- **Tesi di dottorato**

[T1] **F. Caccavale,** *Modellistica e Controllo di Manipolatori Cooperanti: Teoria ed Esperimenti*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica ed Informatica, Napoli, 1997.

- **Riviste a diffusione internazionale**

[**RI1**] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, "Identification of dynamic parameters and feedforward control for a conventional industrial manipulator," *Control Engineering Practice*, Vol. 2, No. 6, pp. 1039–1050, Elsevier Science Ltd, Oxford (UK), 1994.

[RI2] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, B. Siciliano, "Experiments of kinematic control on a redundant robot manipulator with non-spherical wrist," *Laboratory Robotics and Automation*, Vol. 8, pp. 25–36, John Wiley & Sons Inc., New York (NY), 1996.

[**RI3**] **F. Caccavale**, S. Chiaverini, B. Siciliano, "Second-order kinematic control of robot manipulators with jacobian damped least-squares inverse: Theory and experiments," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 2, pp. 188–194, The Insistute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway (NJ), 1997.

[RI4] **F. Caccavale**, C. Natale, B. Siciliano, L. Villani, "Resolved-acceleration control of robot manipulators: A critical review with experiments," *Robotica*, Vol. 16, pp. 565–573, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 1998.

[**RI5**] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, "Stability analysis of a joint space control law for a two-manipulator system," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 44, pp. 85–88, The Insistute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway (NJ), 1999.

[**RI6**] **F. Caccavale**, C. Natale, B. Siciliano, L. Villani, "Six-dof impedance control based on angle/axis representations," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, pp. 289–300, The Insistute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway (NJ), 1999.

[**RI7**] **F. Caccavale**, B. Siciliano, L. Villani, "The role of Euler parameters in robot control," *Asian Journal of Control*, Vol. 1, pp. 25–34, The Chinese Automatic Control Society, Taiwan, 1999.

[**RI8**] G. Antonelli, **F. Caccavale**, P. Chiacchio, "A systematic procedure for the identification of dynamic parameters of robot manipulators," *Robotica*, Vol. 17, pp. 427–435, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 1999.

[**RI9**] **F. Caccavale**, B. Siciliano, L. Villani, "Robot impedance with nondiagonal stiffness for robot manipulators," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 44, pp. 1943–1946, The Insistute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway (NJ), 1999.

[**RI10**] **F. Caccavale**, L. Villani, "Output feedback control for attitude tracking," *Systems and Control Letters*, Vol. 38, pp. 91–98, Elsevier Science Ltd, Oxford (UK), 1999.

[RI11] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, "An experimental setup for cooperative manipulation based on industrial manipulators," *Industrial Robot* , Vol. 27, pp. 120–130, MCB University Press, Bradford (UK), 2000.

[**RI12**] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, "Task-space regulation of cooperative manipulators," *Automatica*, Vol. 36, pp. 879–887, Elsevier Science Ltd, Oxford (UK), 2000.

[**RI13**] G. Antonelli, **F. Caccavale**, S. Chiaverini, L. Villani, "Tracking control for underwater vehicle-manipulator systems with velocity estimation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 25, pp. 399–413, The Insistute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway (NJ), 2000.

[RI14] **F. Caccavale**, L. Villani, "Impedance Control of Cooperative Manipulators," *Machine Intelligence and Robotic Control*, Vol. 2, pp. 51–57, Cyber Scientific, Fukuoka (J), 2000.

[RI15] **F. Caccavale**, C. Natale, B. Siciliano, L. Villani, "Achieving a cooperative behaviour in a dual-arm robot system via a modular control structure," *Journal Robotic Systems*, 2000. In corso di pubblicazione.

[RI16] **F. Caccavale**, B. Siciliano, "Kinematic control of redundant free-floating robotic systems," *Advanced Robotics*, 2000. Accettato per la pubblicazione.

- **Riviste a diffusione nazionale**

[RN1] **F. Caccavale**, A. Carozzi, P. Chiacchio, "Manipolazione cooperante: un'installazione sperimentale," *Automazione e Strumentazione*, Vol. XLIV, pp. 117–122, Editrice BIAS Sas, Milano, 1996.

- **Atti di congressi internazionali e capitoli di libri**

[CI1] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, "Experiments of feedforward control on a conventional industrial manipulator," *Proceedings of the 1994 American Control Conference*, pp. 1001–1002, Baltimore, MD, 1994.

[CI2] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, "Identification of dynamic parameters for a conventional industrial manipulator," *Preprints of the 10th IFAC Symposium on System Identification*, pp. 583–588, Copenhagen, DK, 1994.

[CI3] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, "Energy-based identification of dynamic parameters for a conventional industrial manipulator," *Preprints of the 4th IFAC Symposium on Robot Control*, pp. 619–624, Capri, I, 1994.

[CI4] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, "Kinematic control of a seven-joint manipulator with non-spherical wrist," *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 50–55, Vancouver, CA, 1995.

[CI5] **F. Caccavale**, J. Szewczyk, "Experimental results of operational space control on a dual-arm robot system," *6th International Symposium on Robotics and Manufacturing*, Montpellier, F, 1996, in [CL1] *Robotics and Manufacturing – Recent Trends in Research and Applications*, M. Jamshidi, F. Pin and P. Dauchez (Eds.), ASME Press, New York, NY, pp. 121–126, 1996.

[CI6] J. Szewczyk, **F. Caccavale**, P. Chiacchio, L. Sciavicco, "Ernet activities at the University of Naples: Control of cooperative manipulators," *Research Workshop of ERNET – European Robotics Network*, Darmstadt, D, 1996, in [CL2] *Advances in Robotics – The ERNET Perspective*, C. Bonivento, C. Melchiorri and H. Tolle (Eds.), World Scientific, London, UK, pp. 31–40, 1996.

[CI7] **F. Caccavale**, S. Chiaverini, B. Siciliano, "Singularity-robust second-order kinematic control of robot manipulators," *5th International Workshop on Advances in Robot Kinematics*, Portorož, SLO, 1996, in [CL3] *Recent Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarčič and V. Parenti-Castelli (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, pp. 39–46, 1996.

[CI8] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, "Cooperative task-space control with kinetostatic filtering of a two-manipulator system," *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 37–42, Detroit, MI, 1996.

[CI9] F. Bruni, **F. Caccavale**, C. Natale, L. Villani, "Experiments of impedance control on an industrial robot manipulator with joint friction," *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 205–210, Detroit, MI, 1996.

[CI10] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, "Stability analysis of a joint space control law for a two-manipulator system," *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3008–3013, Kobe, J, 1996.

[CI11] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, B. Siciliano, "Experiments of kinematic control on a two robot system," *11th CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, Udine, I, 1996, in [CL4] *Romansy 11 – Theory and Practice of Robots and Manipulators*, A. Morecki, G. Bianchi and C. Rzymkowski (Eds.), Springer-Verlag, Wien, A, pp. 285–292, 1997.

[CI12] G. Antonelli, **F. Caccavale**, P. Chiacchio, "Experimental estimation of dynamic parameters for an industrial manipulator," *Proceedings of the 2nd IMACS Symposium on Mathematical Modeling*, pp. 667-672, Wien, A, 1997.

[CI13] **F. Caccavale**, I.D. Walker, "Observer-based fault detection for robot manipulators," *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2881–2887, Albuquerque, NM, 1997.

[CI14] **F. Caccavale**, C. Natale, B. Siciliano, L. Villani, "Experiments of spatial impedance control," *5th International Symposium on Experimental Robotics*, Barcelona, SP, 1997, in [CL5] *Experimental Robotics V*, A. Casals and A.T. de Almeida (Eds.), Springer-Verlag, London, UK, pp. 93–104, 1998.

[CI15] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, "A cooperative task-space control law for a two-manipulator system," *Preprints of 5th IFAC Symposium on Robot Control*, pp. 367–372, Nantes, F, 1997.

[CI16] **F. Caccavale**, B. Siciliano, L. Villani, "Quaternion-based impedance with non-diagonal stiffness for robot manipulators," *Proceedings of the 1998 American Control Conference*, pp. 468–472, Philadelphia, PA, 1998.

[CI17] W. Wróblewski, **F. Caccavale**, "A spatial algebra approach to kinematic control of dual-arm systems," *6th International Symposium on Advances in Robot Kinematics*, Strobl, A, 1998, in [CL6] *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control*, J. Lenarčič and M.L. Husty (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, pp. 197–206, 1998.

[CI18] **F. Caccavale**, W. Wróblewski, "Comparison of Newton-Raphson and Jacobian transpose inverse kinematics algorithms," *Proceedings of the 5th International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics*, pp. 905–910, Miedzyzdroje, PL, 1998.

[CI19] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, "A quaternion-based regulator for cooperative manipulators," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 557–561, Trieste, I, 1998.

[CI20] **F. Caccavale**, C. Natale, B. Siciliano, L. Villani, "Control of two industrial robots for parts mating," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 562–566, Trieste, I, 1998.

[CI21] **F. Caccavale**, "Experiments of observer-based fault detection for an industrial robot," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 480–484, Trieste, I, 1998.

[CI22] G. Antonelli, **F. Caccavale**, S. Chiaverini, L. Villani, "An output feedback algorithm for position and attitude tracking control of underwater vehicles," *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4567–4572, Tampa, FL, 1998.

[CI23] **F. Caccavale**, L. Villani, "Output feedback tracking control for a class of mechanical systems," *Preprints of the 14th IFAC World Congress*, vol. B, pp. 245–250, Beijing, PRC, 1999.

[CI24] **F. Caccavale**, C. Natale, L. Villani, "Task-space tracking control without velocity measurements," *Proceedings of the 1999 IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 512–517, Detroit, MI, 1999.

[CI25] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, S. Chiaverini, " Analysis of a task-space regulator for cooperative manipulators," *Proceedings of the 1999 American Control Conference*, pp. 1945–1949, San Diego, CA, 1999.

[CI26] G. Antonelli, **F. Caccavale**, S. Chiaverini, "A modular scheme for adaptive control of underwater vehicle-manipulator systems," *Proceedings of the 1999 American Control Conference*, pp. 3008–3012, San Diego, CA, 1999.

[CI27] **F. Caccavale**, C. Natale, B. Siciliano, L. Villani, "Quaternion-based impedance control for dual-robot cooperation," *9th International Symposium on Robotics Research*, Snowbird, UT, 1999, in [CL7] *Robotics Research: The Ninth International Symposium*, D. Koditschek and J. Hollerbach (Eds.), pp. 59–66, Springer-Verlag, London, UK, 2000.

[CI28] **F. Caccavale**, S. Chiaverini C. Natale, B. Siciliano, L. Villani, "Geometrically consistent impedance control for dual-robot manipulation," *2000 IEEE*

International Conference on Robotics and Automation, pp. 3873–3878, San Francisco, CA, 2000.

[CI29] **F. Caccavale**, G. Ruggiero, B. Siciliano, L. Villani, "On the dynamics of a class of parallel robots," *8th International Symposium on Advances in Robot Kinematics*,Portorož, SLO, 2000, in [CL8] *Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarčič and M.M. Stanišić (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, pp. 187–196, 2000.

[CI30] G. Antonelli, **F. Caccavale**, S. Chiaverini, L. Villani, "Control of underwater vehicle-manipulator systems using only position and orientation measurements," *Preprints of the 6th IFAC Symposium on Robot Control*, pp. 463–468, Vienna, A, 2000.

[CI31] **F. Caccavale**, G. Ruggiero, B. Siciliano, L. Villani, "Impedance control for a class of parallel robots," *Preprints of the 6th IFAC Symposium on Robot Control*, pp. 385–390, Vienna, A, 2000.

[CI32] **F. Caccavale**, L. Villani, "Impedance control for multi-arm manipulation," *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3465–3470, Sydney, AU, 2000.

[CI33] **F. Caccavale**, B. Siciliano, "Quaternion-based kinematic control of redundant spacecraft/manipulator systems," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 435–440, Seoul, KR, 2001.

[CI34] G. Antonelli, **F. Caccavale**, S. Chiaverini, G. Fusco, "A novel adaptive control law for autonomous underwater vehicles," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 447–452, Seoul, KR, 2001.

[CI35] G. Antonelli, F. Caccavale, S. Chiaverini,"A modular approach to adaptive tracking control of serial-chain multibody systems," *Electronic Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Dubrovnik, HR, 2001.

[CI36] **F. Caccavale**, L. Villani, "An impedance control strategy for cooperative manipulation," *Proceedings of the 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 343–348, Como, I, 2001.

- **Atti di workshops internazionali**

[WI1] **F. Caccavale**, B. Siciliano, "Observer-based fault diagnosis for robotic systems," *Proceedings of the 1st IARP/IEEE-RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments*, VII-3, Seoul, KR, 2001.

- **Atti di congressi nazionali**

[CN1] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, "Determinazione di traiettorie ottimali per l'identificazione dinamica di manipolatori," *Atti del Convegno Anipla AUTOMAZIONE '94*, pp. 78–83, Perugia, I, 1994.

[CN2] G. Antonelli, **F. Caccavale**, P. Chiacchio, "Experimental identification of robot manipulators: A user-oriented procedure," *Atti del Convegno Anipla AUTOMAZIONE '98*, pp. 371–379, Milano, I, 1998.

[CN3] **F. Caccavale**, L. Villani, "Impedance control of cooperative manipulators," *Proceedings of CONTROLO 2000: 4th Portuguese Conference on Automatic Control*, pp. 516–521, Guimarães, P, 2000.

- **Articoli sottomessi per la pubblicazione**

[RS1] **F. Caccavale**, C. Natale, L. Villani, "Observer-based control for a class of mechanical systems," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2000.

[RS2] **F. Caccavale**, P. Chiacchio, I.D. Walker, "Observer-based fault detection and isolation for an industrial manipulator," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000.

[RS3] G. Antonelli, **F. Caccavale**, S. Chiaverini,"Adaptive tracking control of underwater vehicle-manipulator systems based on the virtual decomposition approach", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001.

[RS4] G. Antonelli, **F. Caccavale**, S. Chiaverini, G. Fusco, "A novel adaptive control law for underwater vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001.

[CS1] G. Antonelli, **F. Caccavale**, S. Chiaverini, G. Fusco, "On the use of integral control actions for autonomous underwater vehicles," *2001 European Control Conference*, Porto, P, 2001.

Fabrizio CACCAVALE