

INFORMAZIONI ESSENZIALI SULL'ATTIVITÀ SCIENTIFICA E DIDATTICA DI

LUIGI VILLANI

GENERALITÀ

Nato a Avellino il 05/12/1966

Residente a Bonito (AV), via Roma 196

E-mail: luigi.villani@unina.it

Home page: <http://wpage.unina.it/lvillani>

ATTUALE POSIZIONE

Professore Associato per il settore scientifico disciplinare ING-INF/04-Automatica presso il Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (chiamato il 01/11/2002, idoneo dal 07/08/2000).

POSIZIONI PRECEDENTEMENTE RICOPERTE

- 1999-02** *Ricercatore* per il settore scientifico-disciplinare ING-INF/04–Automatica afferente al Dipartimento di Informatica e Sistemistica e al Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica della Università degli Studi di Napoli Federico II.
- 1997-99** *Borsista post-dottorato* presso il Dipartimento di Informatica e Sistemistica della Università degli Studi di Napoli Federico II.
- 1995** *Visiting Scholar* presso il Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, Francia, nell'ambito di "European Robotics NETwork", finanziato da Human Capital and Mobility Programme della Commissione Europea (sei mesi).
- 1992-95** *Dottorando di ricerca* in Ingegneria Elettronica e Informatica, VIII ciclo, con sede amministrativa presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II (curriculum in Automatica e Sistemistica).

FORMAZIONE

- Nov. 1996** Titolo di *Dottore di Ricerca*, Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica e Informatica, VIII ciclo, con sede amministrativa presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II (curriculum in Automatica e Sistemistica).
- Apr. 1992** *Laurea* in Ingegneria Elettronica presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II con voti 110/110 lode.

ATTIVITÀ SVOLTA

Attività scientifica

L'impegno scientifico ha avuto carattere sia metodologico che applicativo. L'interesse prevalente è stato lo sviluppo e l'applicazione di metodologie di controllo innovative nel campo della robotica e dei sistemi meccanici non lineari.

I temi di ricerca affrontati spaziano dalle problematiche del controllo dell'interazione di manipolatori sia rigidi che flessibili con l'ambiente, al controllo di sistemi robotici cooperanti, fino a problematiche di stima del moto mediante sistemi di visione e di controllo servo visivo. Sono state utilizzate tecniche di analisi e di controllo avanzate che includono la passività, il controllo adattativo, il controllo robusto ed il controllo non lineare con ricostruzione dello stato.

L'esperienza acquisita sulle problematiche di controllo dell'interazione, sia dal punto di vista metodologico che da quello sperimentale, è maturata nella preparazione di un libro monografico sull'argomento, pubblicato nel 1999 presso la casa editrice Kluwer Academic Publishers, che vede il prof. Bruno Siciliano come coautore. Di recente è stato invitato, insieme al prof. Joris De Schutter della Katholieke Universiteit Leuven, Leuven (Belgio), a scrivere il capitolo "Robot Force Control" per lo *Handbook of Robotics* edito da Springer-Verlag, la cui pubblicazione è prevista nel 2006.

La convinzione che la verifica sperimentale sia un aspetto fondamentale della ricerca ha motivato una intensa attività di laboratorio. L'impegno sperimentale, oltre a dare validazione alle metodologie proposte, è stato anche continua fonte di stimolo per nuovi interessi di ricerca.

I contributi di ricerca più significativi riguardano:

- **Controllo parallelo forza/posizione dell'interazione di manipolatori con l'ambiente.** Derivazione di una nuova prova di stabilità per un regolatore parallelo forza/posizione; proposta di una legge di controllo parallelo forza/posizione di tipo passivo e di leggi adattative rispetto ai parametri del modello dinamico; proposta di algoritmi che non richiedono la misura diretta di velocità.
- **Controllo adattativo dell'interazione con superfici di rigidità non nota.** Proposta di leggi di controllo forza/posizione di tipo parallelo e di tipo ibrido con adattamento rispetto al coefficiente di rigidità dell'ambiente.
- **Controllo dell'interazione per compiti a sei gradi di libertà.** Individuazione di una classe di rappresentazioni geometricamente consistenti dell'errore di orientamento; derivazione di una legge di controllo di impedenza a sei gradi di libertà geometricamente consistente basata su una formulazione di tipo energetico.
- **Controllo di sistemi multi-robot.** Proposta di una tecnica di controllo per sistemi multi-robot basata sul concetto di impedenza geometricamente consistente definita sia a livello dell'oggetto manipolato sia a livello del singolo manipolatore.

- **Controllo di sistemi meccanici articolati con osservatori dello stato.** Derivazione di osservatori non lineari dello stato per il controllo del moto di sistemi meccanici articolati.
- **Stima del moto di oggetti basata su misure visive e controllo servo visivo.** Proposta di un nuovo algoritmo per la stima in tempo reale di posizione e orientamento di oggetti in moto basato sul filtro di Kalman esteso e su una efficiente tecnica di selezione delle caratteristiche immagine.

Più di recente, Luigi Villani si è occupato di problematiche di **diagnosi di guasti in sistemi mecatronici**, in collaborazione con il prof. Fabrizio Caccavale della Università della Basilicata. In particolare, ha contribuito allo sviluppo di tecniche per la rilevazione e l'isolamento di guasti basati su osservatori non lineari; tali tecniche prevedono l'utilizzo di algoritmi adattativi e di interpolatori neurali. Un prodotto di tale attività è stata la pubblicazione in qualità di co-editor, presso la casa editrice Springer-Verlag, di un libro che raccoglie i recenti sviluppi della ricerca internazionale nel campo.

L'attività sperimentale è stata svolta prevalentemente presso il laboratorio PRISMA del Dipartimento di Informatica e Sistemistica della Università degli Studi di Napoli Federico II, di cui Luigi Villani è stato responsabile nel triennio 2001–2003. In particolare, attraverso l'impegno diretto e la supervisione di tesisti e dottorandi di ricerca, Luigi Villani ha contribuito alla realizzazione di una piattaforma sperimentale costituita da due robot industriali cooperanti dotati di sensori di forza, di un sistema di visione stereo e di una architettura di controllo aperta basata su Personal Computer con sistema operativo RTAI-Linux.

L'attività di ricerca di Luigi Villani ha avuto come riconoscimento internazionale la nomina ad Associate Editor nel Conference Editorial Board di IEEE Control Systems Society (dal Gennaio 2000) e ad Associate Editor di IEEE Transactions on Control Systems Technology (dal Gennaio 2005).

Attività didattica istituzionale

Insegnamenti tenuti presso l'Università di Napoli Federico II

- 2004-05** *Automatica* (6 CFU), Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica.
- 2004-05** *Elementi di Automazione* (6 CFU), Corso di Laurea in Ingegneria Informatica.
- 2003-04** *Automazione Industriale* (annualità), Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale.
- 2003-04** *Elementi di Automazione* (6 CFU), Corso di Laurea in Ingegneria Informatica.
- 2002-03** *Automazione Industriale* (annualità), Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale.
- 2002-03** *Fondamenti di Sistemi Dinamici* (6 CFU), Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni.
- 2001-02** *Automazione Industriale* (annualità), Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale.
- 2001-02** *Controlli Automatici* (6 CFU), Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni.

- 2000-01** *Elementi di Automatica II* (semi-annualità), Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica.
- 1999-00** *Tecnologie dei Sistemi di Controllo II* (semi-annualità), Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica.
- 1996-97** *Tecnologie dei Sistemi di Controllo II* (semi-annualità), Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica e Automatica.
- 1995-96** *Controlli Automatici* (semi-annualità), Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica e Automatica.

Assistenza didattica da ricercatore presso l'Università di Napoli Federico II

- 1999-02** *Teoria dei Sistemi*, Corsi di Laurea in Ingegneria Elettronica e in Ingegneria Informatica (docente prof. G. Celentano).
- 1999-01** *Automazione Industriale*, Corsi di Laurea in Ingegneria Gestionale (docenti proff. F. Garofalo e F. Caccavale).

Insegnamenti tenuti presso altri atenei

- 1995-96** *Teoria dei Sistemi* (semi-annualità), Diploma Universitario in Ingegneria Elettronica, Università degli Studi di Salerno
- 1995-96** *Controlli Automatici* (semi-annualità), Diploma Universitario in Ingegneria Elettronica, Università degli Studi di Salerno

Tutoraggio, tesi di laurea, tirocinii, commissione di esame

- 2004-oggi** Presidente della commissione di esame di *Controlli Automatici*, vecchio ordinamento, per la Laurea in Ingegneria Elettronica.
- 2005-oggi** Presidente della commissione di esame di *Controlli Automatici*, vecchio ordinamento, per la Laurea in Ingegneria Elettrica.
- 1996-oggi** Relatore di numerose tesi di Laurea in *Robotica Industriale e Automazione Industriale* per i Corsi di Laurea in Ingegneria Elettronica, Informatica, Meccanica e Gestionale.
- 2001-03** Tutor dell'ing. Vincenzo Lippiello, dottorando di ricerca del XVI ciclo in Ingegneria Elettronica, Informatica e delle Telecomunicazioni.
- 2001-03** Tutor per il corso di *Elementi di Automazione* della Laurea in Ingegneria Informatica (attività oggetto di incentivazione).
- 1999-02** Tutor per lo svolgimento di tirocinii aziendali per il Corso di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica.

Altre attività didattiche

- Mag. 2005** Corso di Formazione per Laureati, Stopfire S.p.a., Quarto, Napoli, "Programmazione di Robot Industriali".

- Apr. 2005** Corso di Formazione per Laureati, Stopfire S.p.a., Quarto, Napoli, “Sistemi di controllo basati su PLC”.
- Lug. 2004** Corso di Formazione per Laureati, Elasis, Pomigliano d’Arco, Napoli, “Fondamenti di Controlli Automatici”.
- Nov. 2000** Corso di Formazione per Laureati, 3F Data System, Pozzuoli, Napoli, “Programmazione di sistemi PLC”.
- Mag. 1998** *2^o Master in Tecnologie Avanzate dell’Informazione e della Comunicazione*, Istituto Internazionale per gli Alti Studi Scientifici E.R. Caianiello, Vietri sul Mare (SA), “Robotica”.
- Mag. 1998** *Seconda Università degli Studi di Napoli, Facoltà di Ingegneria*, Ciclo di seminari su “Robotica Industriale: controllo, unità di governo e programmazione”.
- Mar. 1995** *Università degli Studi di Salerno, Diploma Universitario in Ingegneria Elettronica*, Seminari di Teoria dei Sistemi.

Collaborazioni scientifiche con enti e industrie

- 2004** Collaborazione al contratto di ricerca tra il Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell’Università degli Studi di Napoli Federico II e Alenia Spazio di Torino per lo studio di fattibilità “Robotic Technologies for On-Orbit Servicing” per conto dell’Agenzia Spaziale Italiana.
- 2004** Collaborazione al contratto di ricerca tra il Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell’Università degli Studi di Napoli Federico II e Galileo Avionica di Milano per lo studio di fattibilità “SUPER: Space Unmanned Planetray Exploration Rover” per conto dall’Agenzia Spaziale Italiana.
- 2004** Collaborazione al contratto di ricerca tra il Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell’Università degli Studi di Napoli Federico II e DGA S.a.s. di Gragnano (NA) sul progetto “Sistema Miniaturizzato di Movimentazione Assi Remoti Telecontrollati”.
- 2004-pres** Consulente per conto del consorzio di ricerca CREATE sullo studio di fattibilità “Colonoscopia assistita” commissionato dal Policlinico Universitario Agostino Gemelli di Roma.
- 2002** Consulente per conto del consorzio di ricerca CREATE sul contratto di ricerca “Pianificazione del moto e controllo di cedevolezza di robot industriali” finanziato da COMAU, Beinasco (TO).
- 2001** Consulente per conto del consorzio di ricerca CREATE sul contratto di ricerca “Modellistica, Identificazione e Controllo di Robot Industriali” finanziato da COMAU, Beinasco (TO).

Servizi prestati negli Atenei

- 2001-oggi** Membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Informatica e Automatica.

- 2003,2005** Membro di commissioni giudicatrici di concorsi di assegno di ricerca.
- 2003** Membro della commissione giudicatrice per l'ammissione al Dottorato di Ricerca in Ingegneria Informatica e Automatica.

Attività in progetti di ricerca nazionali e internazionali

Responsabilità scientifica

- 2005** Responsabile scientifico dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per la proposta di Programma di Ricerca di Interesse Nazionale "HYFLEX –Controllo di sistemi multi-robot per celle di lavorazione iperflessibili)".
- 2002-oggi** Responsabile scientifico dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Progetto "Web Learning per la qualità del capitale umano. Linea 2: FAIROBOT", co-finanziato dal Fondo Speciale per lo Sviluppo della Ricerca Strategica del MIUR.
- 2002-04** Responsabile scientifico dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Progetto di Ricerca "HW/SW Architectures and Coordination/Control Algorithms for Multirobot Systems", finanziato da ASI.

Partecipazione

- 2005-oggi** Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il progetto di ricerca internazionale "PHRIDOM Physical HumanRobot Interaction in anthropic DOMains: safety and dependability" finanziato da EURON 2.
- 2004-oggi** Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per la Rete di Eccellenza "EURON 2: European Robotics Network" finanziata dalla Commissione Europea.
- 2002-oggi** Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Progetto PON "Sistema Robotizzato di Spegnimento Incendi e Monitoraggio Ambientale Permanente per Gallerie Stradali e Ferroviarie", co-finanziato da MIUR.
- 2001-02** Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Programma di Ricerca di Interesse Nazionale "Metodi e strumenti innovativi per la progettazione di sistemi mecatronici" finanziato da MIUR.
- 2000-01** Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per il Programma di Ricerca di Interesse Nazionale "MISTRAL: Metodologie e Integrazione di Sottosistemi e Tecnologie per la Robotica Antropica e la Locomozione" finanziato da MIUR.

- 1999-04** Componente dell'Unità Operativa del Dipartimento di Informatica e Sistemistica dell'Università di Napoli Federico II per la Rete di Eccellenza "EURON: European Robotics Network" finanziata dalla Commissione Europea.
- 1999-01** 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.
- 1998-99** 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 Tecnologie" finanziato da MURST.
- 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.
- 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.
- 1994-98** 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.
- 1994-95** 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.
- 1993-96** 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 dalla Commissione Europea.

Organizzazione di eventi scientifici in sede nazionale e internazionale

- 2005** National Committee member di *8th IFAC Symposium on Robot Control*, Bologna, I, Set. 2006.
- 2004** Program Committee member di *IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics*, Kobe, Japan, Giu. 2005.
- 2004** Program Committee member di *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, Mag. 2005.
- 2004** Program Committee member di *IASTED International Conference on Robotics and Applications*, Honolulu, Hawaii, Ago. 2004.
- 2003** Program Committee member di *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, Mag. 2004.

- 2003** Co-organizzatore della sessione “Controllo con asservimento visivo” per la Scuola di Dottorato CIRA “Controllo di Sistemi Robotici per la Manipolazione e la Cooperazione”, Lug. 2003.
- 2003** Program Committee member di *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, NV, Ott. 2003.
- 2002** Program Committee member di *2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Houston, Texas, Ott. 2003.
- 2002** Co-chair del Workshop *Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Dynamic Systems* in concomitanza con *2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Vancouver, Canada, Ott. 2002.
- 2002** Publication Chair di *8th International Symposium on Experimental Robotics (ISER'02)*, Sant'Angelo d'Ischia, Italia, Lug. 2003.
- 2002** Program Committee member di *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, Mag. 2003.
- 1999** Program Committee member di *2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco CA, USA, Mag. 2000.

Attività editoriale e contributi a organizzazioni scientifiche internazionali

- 2005-oggi** Associate Editor di *IEEE Transactions on Systems Control Technology*.
- 2003-oggi** Senior Member IEEE.
- 2000-oggi** Associate Editor nel Conference Editorial Board di *IEEE Control Systems Society*.
- 2000** Guest co-editor del numero speciale “Force Control of Advanced Robotic Systems” della rivista scientifica *Machine Intelligence and Robotic Control*, **2** (2), 2000.
- 1992-oggi** Revisore scientifico per le riviste internazionali:
ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control
Automatica
Dynamics and Control
European Journal of Control
IASTED International Journal of Robotics and Automation
IEEE Transactions on Automatic Control
IEEE Transactions on Control Systems Technology
IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
IEEE Transactions on Robotics and Automation
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics
International Journal of Robotics Research
Iranian Journal of Control
Journal of Robotic Systems
Robotica
- 1992-oggi** Revisore scientifico per numerosi convegni internazionali.

PRESENTAZIONE DELLE 15 PUBBLICAZIONI PIÙ SIGNIFICATIVE

- [1] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “Force/position regulation of compliant robot manipulators”, *IEEE Transactions on Automatic Control (technical note)*, **39**, 647–652, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1994.
- [2] B. Siciliano, L. VILLANI, “A passivity-based approach to force regulation and motion control of robot manipulators”, *Automatica (brief paper)*, **32**, 443–447, Elsevier, Oxford, UK, 1996.
- [3] B. Siciliano, L. VILLANI, “An output feedback parallel force/position regulator for a robot manipulator in contact with a compliant environment”, *Systems & Control Letters*, **29**, 295–300, Elsevier, Oxford, UK, 1997.
- [4] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “A survey of robot interaction control schemes with experimental comparison”, *IEEE Transactions on Mechatronics (regular paper)*, **4**, 273–285, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1999.
- [5] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “Force and position tracking: Parallel control with stiffness adaptation”, *IEEE Control Systems Magazine*, **18**(1), 27–33, Piscataway NJ, USA, 1998.
- [6] L. VILLANI, C. Canudas de Wit, B. Brogliato, “An exponentially stable adaptive control for force and position tracking of robot manipulators”, *IEEE Transactions on Automatic Control (technical note)*, **44**, 798–802, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1999.
- [7] L. VILLANI, C. Natale, B. Siciliano, C. Canudas de Wit, “An experimental study of adaptive force/position control algorithms for an industrial robot”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology (regular paper)*, **8**, 777–786, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 2000.
- [8] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Six-dof impedance control based on angle/axis representations”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation (regular paper)*, **15**, 289–300, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1999.
- [9] F. Caccavale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Robot impedance control with nondiagonal stiffness”, *IEEE Transactions on Automatic Control (technical note)*, **44**, 1943–1946, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1999.
- [10] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Achieving a cooperative behaviour in a dual-arm robot system via a modular control structure”, *Journal of Robotic Systems*, **18**, 679–700, John Wiley & Sons, USA, 2001.
- [11] F. Caccavale, L. VILLANI, “Impedance control of cooperative manipulators”, *Machine, Intelligence & Robotic Control*, **2**, 51–57, Cyber Scientific, Fukuoka, J, 2000.
- [12] F. Caccavale, L. VILLANI, “Output feedback control for attitude tracking”, *Systems & Control Letters*, **38**, 91–98, Elsevier, Oxford, UK, 1999.
- [13] G. Antonelli, F. Caccavale, S. Chiaverini, L. VILLANI, “Tracking control for underwater vehicle-manipulator systems with velocity estimation”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **25**, 399–413, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 2000.

- [14] F. Caccavale, C. Natale, L. VILLANI, “Output feedback control of mechanical systems with application to spacecraft and robots”, *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **26**, 273-282, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 2003.
- [15] V. Lippiello, L. VILLANI, “Managing redundant visual measurements for accurate pose tracking”, *Robotica*, **21**, 511-520, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.

Gli articoli sopra elencati fanno riferimento alle linee di ricerca esposte di seguito.

Controllo parallelo forza/posizione dell’interazione di manipolatori con l’ambiente

L’interesse per tale argomento di ricerca deriva dalla necessità di migliorare la capacità di interazione di un manipolatore con l’ambiente per l’esecuzione di compiti, comuni in applicazioni industriali, come l’assemblaggio o l’impiego di utensili per lavorazioni meccaniche. Strategie di controllo che facciano uso della misura delle forze che nascono al contatto dell’organo terminale del manipolatore con l’ambiente risultano più efficaci di algoritmi basati su sole misure di posizione. Il lavoro sviluppato ha riguardato una particolare strategia di controllo, denominata controllo parallelo, che consiste nell’utilizzare un controllore di posizione ed uno di forza operanti in parallelo; lungo le direzioni di interazione l’azione in forza è progettata in maniera che risulti dominante su quella in posizione. Rispetto ad altri algoritmi di controllo proposti in letteratura, questo approccio si dimostra particolarmente efficace nei casi di interazione con ambienti di caratteristiche geometriche e meccaniche non perfettamente note.

Regolazione—Consiste nella regolazione della posizione e della forza esercitata dall’organo terminale di un manipolatore su una superficie. Nel lavoro [1] è stato proposto un regolatore di tipo parallelo contenente azioni di controllo lineare sugli errori di forza e di posizione ed un’azione non lineare di compensazione delle coppie di gravità. In ragione della non linearità delle equazioni del sistema a ciclo chiuso determinata dalla struttura delle equazioni del modello dinamico del manipolatore, per dimostrare la stabilità asintotica dell’equilibrio è stato utilizzato il metodo diretto di Lyapunov, che ha permesso di ottenere condizioni sufficienti sui guadagni delle azioni di controllo. La scelta di una opportuna funzione di Lyapunov ha consentito, in pubblicazioni successive, la sintesi di una legge di controllo di tipo adattativo che corregge gli errori introdotti dalla non perfetta compensazione delle coppie di gravità.

Inseguimento di traiettoria—Obiettivo del controllo è l’inseguimento di una traiettoria desiderata per l’organo terminale su una superficie, con regolazione della forza esercitata al contatto. Tale problema è tipico delle applicazioni di levigatura, lucidatura e, in generale, di lavorazione superficiale. La natura non lineare delle equazioni del modello dinamico del manipolatore riveste un ruolo importante nella sintesi di azioni di controllo che riescano a garantire buone capacità di inseguimento di traiettoria in ampie regioni dello spazio di lavoro. Nel lavoro [2], in alternativa all’approccio tradizionale a “dinamica inversa”, che mira a ottenere un comportamento dinamico a ciclo chiuso indipendente dalla configurazione mediante

un'azione di controllo che cancella la dinamica non lineare, è stato utilizzato un approccio di tipo energetico o "passivo" che, al contrario, preserva la struttura lagrangiana delle equazioni dinamiche e presenta migliori caratteristiche di robustezza nei confronti delle incertezze di modello. Si è considerato sia il caso in cui sono note con precisione le equazioni del modello dinamico, sia quello in cui è nota solo la struttura delle equazioni mentre i parametri che vi compaiono sono affetti da incertezza. Nel caso di parametri noti è stata proposta una classe di leggi di controllo contenenti una parte non lineare basata sul modello ed un'azione lineare costituita da un compensatore di forza ed un compensatore di posizione agenti in parallelo. Nel caso di parametri non noti è stata introdotta una legge adattativa di aggiornamento dei parametri dinamici presenti nella parte non lineare del controllo, sviluppata in pubblicazioni successive.

Ricostruzione dello stato—I robot industriali tipicamente dispongono di sensori per la misura delle sole posizioni angolari agli assi dei motori di giunto. In assenza di misure tachimetriche, nella pratica si ricorre alla differenziazione numerica delle misure di posizione, che in genere introduce livelli di rumore inaccettabili sugli ingressi di controllo. Tale problema ha motivato la ricerca di un algoritmo di regolazione di forza e posizione con velocità ottenute con un filtro ricostruttore a partire dalle misure di posizione [3]. Per il problema dell'inseguimento di posizione e regolazione della forza, in pubblicazioni successive è stato sviluppato e sperimentato un osservatore non lineare che preserva le proprietà di passività del modello dinamico.

Validazione sperimentale—Gli algoritmi proposti sono stati oggetto di accurata validazione sperimentale su di un robot industriale Comau SMART-3 S dotato di un sensore di forza e di un'architettura di controllo aperta. In [4] è presentata una rassegna di algoritmi di controllo dell'interazione, tra cui il controllo parallelo, e sono riportati i risultati di un confronto di tipo sperimentale.

Controllo adattativo dell'interazione con superfici di rigidità non nota

La sintesi di una legge di controllo dell'interazione deve tener conto delle caratteristiche meccaniche dell'ambiente con il quale il manipolatore interagisce; un parametro che influenza in maniera fondamentale le prestazioni del controllo è il coefficiente di rigidità delle superfici a contatto.

Controllo parallelo—Nell'ambito dell'approccio parallelo sopra presentato, nel lavoro [5] è stato proposto un algoritmo di controllo che si adatta al valore effettivo del coefficiente di rigidità dell'ambiente mediante una opportuna legge di aggiornamento basata sull'errore di inseguimento della traiettoria di forza assegnata. Le prove sperimentali su di un robot industriale hanno confermato la robustezza dell'algoritmo, anche in presenza di inevitabili errori di modello.

Controllo ibrido—Tale denominazione è utilizzata in letteratura per le leggi di controllo forza/posizione che tengono esplicitamente conto delle caratteristiche geometriche dell'ambiente di interazione. In questa categoria si inquadra l'approccio adattativo sviluppato in collaborazione con il Laboratoire d'Automatique de Grenoble, in cui l'inseguimento di una traiettoria di forza è ottenuto scalando dinamicamente il riferimento di posizione sulla

base delle forze misurate quando l'organo terminale è in contatto con l'ambiente [6]. Tale idea è anche alla base di una legge di controllo proposta per il problema della regolazione di forza e per la sintesi di leggi di controllo passivo che sono state oggetto di approfondita verifica sperimentale [7].

Controllo dell'interazione per compiti a sei gradi di libertà

La maggior parte degli algoritmi di controllo dell'interazione proposti in letteratura si riferiscono a compiti a tre gradi di libertà, che coinvolgono solo le tre componenti di posizione dell'organo terminale e le tre componenti di forza. In tal caso il compito è caratterizzato da velocità e forze desiderate appartenenti a sottospazi ortogonali, ovvero giacenti lungo direzioni ortogonali dello spazio euclideo. La difficoltà principale dell'analisi dei compiti a sei gradi di libertà (posizione e orientamento, forze e momenti), dipende dalla rappresentazione dell'orientamento dell'organo terminale. L'uso di un numero minimo di coordinate (ad esempio, tre angoli di Eulero) consente di generalizzare su sei gradi di libertà le leggi di controllo sviluppate per i compiti a tre gradi di libertà in maniera consistente da un punto di vista analitico, ma perdendo in generale il significato geometrico. In particolare, relativamente alla parte in orientamento, non è sempre possibile caratterizzare il compito in termini di velocità angolari e momenti desiderati giacenti lungo direzioni ortogonali dello spazio euclideo. Un ulteriore problema delle rappresentazioni minime è costituito dalla presenza di orientamenti singolari: durante l'esecuzione di un compito di interazione non è possibile evitare tali singolarità mediante una scelta opportuna della traiettoria desiderata in orientamento, poiché quest'ultimo dipende anche dai momenti applicati all'organo terminale, che non sono noti a priori. Allo scopo di superare tali problemi è stata presa in esame una rappresentazione non minima e geometricamente consistente dell'orientamento, basata sui quaternioni unitari.

Tale problematica è stata approfondita con riferimento al controllo di impedenza per compiti a sei gradi di libertà. Obiettivo del controllo di impedenza è quello di conferire all'organo terminale del manipolatore un comportamento dinamico desiderato in presenza di forze e momenti applicati, descritto da un'impedenza meccanica. Nel caso di compiti a tre gradi di libertà, l'impedenza è in genere assegnata in termini di un sistema di equazioni lineari del secondo ordine relative ad un sistema meccanico caratterizzato da valori desiderati di massa, smorzamento ed elasticità. L'estensione del concetto di impedenza a compiti a sei gradi di libertà non è immediata per i motivi innanzi esposti, legati alla rappresentazione dell'orientamento. In [8] viene proposta una legge di controllo di impedenza su sei gradi di libertà basata sui quaternioni unitari e su di una formulazione di tipo energetico; l'equazione di impedenza relativa alla parte di orientamento risulta non lineare. Le proprietà geometriche interessanti di tale formulazione (detta "geometricamente consistente") ed i problemi caratteristici della formulazione basata sugli angoli di Eulero sono messi in luce sia da un punto di vista metodologico che sperimentale; viene altresì individuata una classe di rappresentazioni dell'orientamento di tipo asse/angolo, cui appartiene anche il quaternionone unitario, che risulta essere geometricamente consistente. Significativi sviluppi metodologici hanno riguardato la definizione di un'equazione di impedenza caratterizzata da termini di accoppiamento tra la parte traslazionale e quella rotazionale, utili per l'esecuzione di compiti di assemblaggio [9].

Controllo di sistemi multi-robot

L'adozione di più robot cooperanti nell'esecuzione di compiti di manipolazione consente di accrescere la capacità di carico complessiva del sistema, sia in termini di peso che di dimensioni dell'oggetto manipolato, e di migliorarne la destrezza, ovvero l'abilità nell'eseguire compiti complessi. Spesso il compito richiede l'interazione fisica tra i singoli manipolatori attraverso l'oggetto manipolato. In tal caso, oltre al coordinamento del moto, è indispensabile assicurare la limitatezza delle forze di interazione (forze interne) e, allo stesso tempo, il mantenimento della presa. A tale scopo possono rendersi utili strategie di controllo della posizione dell'oggetto manipolato, della posizione relativa dei singoli manipolatori e delle forze interne (controllo forza/posizione, controllo di impedenza). In tale ambito è stata progettata una struttura di controllo modulare per un sistema di due robot cooperanti, di cui uno controllato in posizione e l'altro in forza o in impedenza [10]. Tale architettura di controllo è stata oggetto di verifiche sperimentali nell'esecuzione di compiti di accoppiamento di parti meccaniche e di lavorazione superficiale.

Il sistema di robot cooperanti può interagire con un ambiente esterno. In tali situazioni è cruciale garantire la limitatezza sia delle forze interne scambiate tra i manipolatori attraverso l'oggetto, sia delle forze esterne scambiate dall'oggetto con l'ambiente. A tale scopo, nel lavoro [11], viene proposta una strategia di controllo basata su un concetto di impedenza geometricamente consistente definito sia a livello dell'oggetto manipolato, per garantire un comportamento cedevole in presenza di interazione con l'ambiente, sia a livello del singolo manipolatore, per garantire la limitatezza delle forze interne. Tale strategia di controllo richiede solo una stima delle caratteristiche inerziali dell'oggetto.

Controllo di sistemi meccanici articolati con osservatori dello stato

Un sistema meccanico articolato è costituito da un insieme di corpi rigidi accoppiati mediante giunti. La configurazione del sistema può essere rappresentata da un insieme di coordinate generalizzate (variabili di giunto, coordinate cartesiane) e da un insieme di matrici di rotazione che descrivono l'orientamento di terne di coordinate di interesse. Una rappresentazione globalmente valida per l'orientamento si può ottenere utilizzando il quaternion unitario in luogo delle usuali rappresentazioni minime (angoli di Eulero, angoli di Roll-Pitch-Yaw), che soffrono di problemi di singolarità. Le leggi di controllo del moto proposte in letteratura per questa classe di sistemi tipicamente utilizzano rappresentazioni minime per l'orientamento e richiedono la misura dell'intero stato, caratterizzato sia dalle variabili di configurazione che dalle corrispondenti velocità. Nella pratica i sensori di velocità spesso non sono disponibili e si ricorre alla differenziazione numerica delle misure di posizione, che in genere introduce livelli di rumore inaccettabili sugli ingressi di controllo. In [12] viene presentato un algoritmo per il controllo di assetto di un satellite basato sui quaternioni e su un osservatore non lineare che garantisce stabilità a ciclo chiuso di tipo esponenziale. Un algoritmo analogo è proposto in [13] per il controllo di un sistema veicolo-manipolatore di tipo sottomarino. Tale approccio viene generalizzato in [14] dove sono altresì riportati risultati sperimentali nel caso del controllo di posizione e di orientamento di un robot manipolatore a sei gradi di mobilità.

Stima del moto di oggetti basata su misure visive e controllo servo visivo

Le capacità di autonomia del sistema robotico possono essere notevolmente potenziate dall'utilizzo di informazioni sulle caratteristiche geometriche dell'ambiente ottenute attraverso una o più telecamere. L'informazione di tipo visivo, opportunamente elaborata, può essere utilizzata sia a livello di pianificazione del moto, per il riconoscimento e la localizzazione di oggetti o l'aggiramento di ostacoli, sia a livello di controllo, per migliorare l'accuratezza di posizionamento del sistema robotico e la capacità di seguire oggetti in movimento. Ai fini del controllo servo visivo, noto come "visual servoing", le immagini acquisite dal sistema di visione, opportunamente calibrato, possono essere utilizzate per ricostruire posizione e orientamento di oggetti fissi o in movimento nello spazio di lavoro del sistema robotico.

Alla luce di tali obiettivi sono stati studiati algoritmi per l'estrazione in tempo reale di dati utili per il controllo da immagini fornite da telecamere. In particolare, nel lavoro [15] è stato proposto un approccio basato sulla stima della posizione e orientamento di oggetti in movimento mediante il filtro di Kalman esteso a partire dalla misura di opportune caratteristiche immagine degli oggetti. La particolare formulazione adottata ha consentito di impiegare simultaneamente le informazioni provenienti da più telecamere e di ricostruire la postura di più oggetti contemporaneamente in moto nello spazio osservato. Uno dei principali ostacoli all'impiego dei sistemi di visione per l'acquisizione in modo robusto di informazioni sulla posizione di oggetti in moto nello spazio di lavoro è la necessità di dover riconoscere tutte le eventuali situazioni di auto e mutua occlusione degli oggetti e gestire la presenza di ostacoli lungo le direzioni di osservazione. La soluzione proposta è basata sull'impiego di particolari strutture dati denominate Binary Space Partitioning Tree (BSP-Tree) per la rappresentazione degli oggetti e degli ostacoli presenti nell'ambiente di lavoro. Utilizzando tali strutture e la predizione di stima offerta dal filtro di Kalman, è stata elaborata una tecnica di pre-selezione delle caratteristiche immagine visibili ed una tecnica per la selezione di un sottoinsieme ottimo di tali caratteristiche, in grado di assicurare elevata accuratezza di stima. Le prove sperimentali effettuate sul sistema di visione disponibile presso il laboratorio PRISMA hanno confermato l'efficacia dell'approccio proposto. Tale tecnica è stata raffinata in lavori successivi con l'adozione di algoritmi adattativi dei parametri statistici del filtro di Kalman, allo scopo di aumentare la robustezza del sistema rispetto alle variazioni delle condizioni di illuminazione della scena. Sono state inoltre sviluppate estensioni per il caso del controllo servo visivo di sistemi multi-robot e per il caso di sistemi di visione basati su telecamere in configurazione ibrida (ovvero, in parte fisse e in parte montate sull'organo terminale del robot).

ELENCO COMPLETO DELLE PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE

Libri

- [L3] S. Chiaverini, F. Caccavale, L. VILLANI, L. Sciavicco, *Fondamenti di Sistemi Dinamici*, McGraw-Hill Libri Italia, Milano, I, 2003.
- [L2] B. Siciliano, L. VILLANI, *Robot Force Control*, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1999.
- [L1] B. Siciliano, L. VILLANI, *Solutions Manual to Accompany Modelling and Control of Robot Manipulators*, 2nd Edition, Springer-Verlag, London, UK, 2000; 1st Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1996.

Libri editi

- [LE1] F. Caccavale, L. VILLANI (Eds.), *Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Mechatronic Systems: Recent Advances*, Springer Tracts in Advanced Robotics, Springer-Verlag, Berlin, D, 2002.

Articoli su riviste internazionali

- [RI29] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Embedding force control into industrial robots”, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, in stampa, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 2005.
- [RI28] F. Caccavale, B. Siciliano, L. VILLANI, “The Tricept robot: Dynamics and impedance control”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **8**, 263-268, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 2003.
- [RI27] V. Lippiello, L. VILLANI, “Managing redundant visual measurements for accurate pose tracking”, *Robotica*, **21**, 511-520, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003.
- [RI26] F. Caccavale, C. Natale, L. VILLANI, “Output feedback control of mechanical systems with application to spacecraft and robots”, *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **26**, 273-282, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 2003.
- [RI25] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “3-D objects motion estimation based on Kalman filter and BSP tree models for robot stereo vision”, *Archives of Control Sciences*, **12**, 71–88, University of Technology Press, Gliwice, PL, 2002.
- [RI24] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Achieving a cooperative behaviour in a dual-arm robot system via a modular control structure”, *Journal of Robotic Systems*, **18**, 679–700, John Wiley & Sons, USA, 2001.
- [RI23] B. Siciliano, L. VILLANI, “An inverse kinematics algorithm for interaction control of a flexible arm with a compliant surface”, *Control Engineering Practice*, **8**, 191–198, Elsevier, Oxford, UK, 2001.

- [RI22] B. Siciliano, L. VILLANI, “Parallel force and position control of flexible manipulators”, *IEE Proceedings – Control Theory and Application*, **147**, 605–612, IEE Press, London, UK, 2000.
- [RI21] F. Caccavale, L. VILLANI, “Impedance control of cooperative manipulators”, *Machine, Intelligence & Robotic Control*, **2**, 51–57, Cyber Scientific, Fukuoka, J, 2000.
- [RI20] B. Siciliano, L. VILLANI, “From indirect to direct force control: A roadmap for enhanced industrial robots”, *Robótica*, **39**(2), 16–26, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- [RI19] G. Antonelli, F. Caccavale, S. Chiaverini, L. VILLANI, “Tracking control for underwater vehicle-manipulator systems with velocity estimation”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **25**, 399–413, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 2000.
- [RI18] L. VILLANI, C. Natale, B. Siciliano, C. Canudas de Wit, “An experimental study of adaptive force/position control algorithms for an industrial robot”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **8**, 777–786, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 2000.
- [RI17] F. Caccavale, L. VILLANI, “Output feedback control for attitude tracking”, *Systems & Control Letters*, **38**, 91–98, Elsevier, Oxford, UK, 1999.
- [RI16] F. Caccavale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Robot impedance control with nondiagonal stiffness”, *IEEE Transactions on Automatic Control (technical note)*, **44**, 1943–1946, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1999.
- [RI15] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “A survey of robot interaction control schemes with experimental comparison”, *IEEE Transactions on Mechatronics (regular paper)*, **4**, 273–285, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1999.
- [RI14] F. Caccavale, B. Siciliano, L. VILLANI, “The role of Euler parameters in robot control”, *Asian Journal of Control*, **1**, 25–34, Chinese Automatic Control Society, China, 1999.
- [RI13] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Six-dof impedance control based on angle/axis representations”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation (regular paper)*, **15**, 289–300, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1999.
- [RI12] L. VILLANI, C. Canudas de Wit, B. Brogliato, “An exponentially stable adaptive control for force and position tracking of robot manipulators”, *IEEE Transactions on Automatic Control (technical note)*, **44**, 798–802, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1999.
- [RI11] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Resolved acceleration control of robot manipulators: A critical review with experiments”, *Robotica*, **16**, 565–573, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998.
- [RI10] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “Force and position tracking: Parallel control with stiffness adaptation”, *IEEE Control Systems Magazine*, **18**(1), 27–33, Piscataway NJ, USA, 1998.
- [RI9] B. Siciliano, L. VILLANI, “Passivity-based interaction controller and observer for robot manipulators”, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control (technical brief)*, **120**, 516–520, ASME Press, New York NY, USA, 1998.

- [RI8] A. Cavallo, L. VILLANI, “Sliding manifold approach to the control of rigid robots: Experimental results”, *Control Engineering Practice*, **5**, 619–625, Elsevier, Oxford, UK, 1997.
- [RI7] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “An adaptive force/position control scheme for robot manipulators”, *Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, numero speciale su *Recent Developments in Robotics*, **7**, 101–111, Technical University Press, Zielona Gora, PL, 1997.
- [RI6] B. Siciliano, L. VILLANI, “An output feedback parallel force/position regulator for a robot manipulator in contact with a compliant environment”, *Systems & Control Letters*, **29**, 295–300, Elsevier, Oxford, UK, 1997.
- [RI5] L. Sciavicco, B. Siciliano, L. VILLANI, “Lagrange and Newton–Euler dynamic modeling of a gear-driven robot manipulator with inclusion of motor inertia effects”, *Advanced Robotics*, **10**, 317–334, VSP BV, Zeist, NL, 1996.
- [RI4] B. Siciliano, L. VILLANI, “Adaptive compliant control of robot manipulators”, *Control Engineering Practice*, **4**, 705–712, Elsevier, Oxford, UK, 1996.
- [RI3] B. Siciliano, L. VILLANI, “A passivity-based approach to force regulation and motion control of robot manipulators”, *Automatica (brief paper)*, **32**, 443–447, Elsevier, Oxford, UK, 1996.
- [RI2] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “Force/position regulation of compliant robot manipulators”, *IEEE Transactions on Automatic Control (technical note)*, **39**, 647–652, IEEE Press, Piscataway NJ, USA, 1994.
- [RI1] B. Siciliano, L. VILLANI, “An adaptive force/position regulator for robot manipulators”, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **7**, 389–403, Wiley, New York NY, USA, 1993.

Articoli su riviste nazionali

- [RN3] F. Caccavale, L. VILLANI, “Un approccio alla diagnosi di guasti in robot industriali”, *Automazione e Strumentazione*, **51**(4), 99-107, VNU Business Publications Italia, Cinisello Balsamo, I, 2003.
- [RN2] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Misure visive per la stima della postura di oggetti in moto”, *Automazione e Strumentazione*, **50**(8), 132–33, Cinisello Balsamo, I, 2002.
- [RN1] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “Controllo dell’interazione di un robot industriale”, *Automazione e Strumentazione*, **46**(8), 107-114, Cinisello Balsamo, I, 1998.

Capitoli di libri internazionali

- [CL11] B. Siciliano, L. VILLANI, “A singular perturbation approach to control of flexible arms in compliant motion”, in *Current Trends in Nonlinear Systems and Control*, L. Menini, L. Zaccarian, C. Abdallah (Eds.), Birkhäuser, Boston, in press, 2005.

- [CL10] B. Siciliano, L. VILLANI, “Inverse kinematics with fuzzy redundancy resolution for a fire fighting robot”, in *On Advances in Robot Kinematics*, C. Galletti and J. Lenarcic (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, 283-292, 2004.
- [CL9] F. Caccavale, V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Real-time visual tracking of 3D objects”, in *Advances in Control of Articulated and Mobile Robots*, B. Siciliano, A. De Luca, C. Melchiorri, G. Casalino (Eds.), Springer Tracts in Advanced Robotics 10, Heidelberg, D, 125–152, 2004.
- [CL8] F. Caccavale, V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Visual tracking of multiple objects using binary space partitioning trees”, in *Robotics Research: The Eleventh International Symposium*, P. Dario and R. Chatila (Eds.), Springer Tracts in Advanced Robotics 15, Heidelberg, D, 305–314, 2003.
- [CL7] F. Caccavale, L. VILLANI, “Fault diagnosis for industrial robots”, in *Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Mechatronic Systems: Recent Advances*, F. Caccavale and L. Villani (Eds.), 85–108, Springer Tracts in Advanced Robotics 1, Springer-Verlag, Berlin, D, 85–108, 2002.
- [CL6] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Interaction control”, in *RAMSETE*, S. Nicosia, B. Siciliano, A. Bicchi, P. Valigi (Eds.), Lecture Notes in Control and Information Sciences 270, Springer-Verlag, Heidelberg, D, 121–154, 2001.
- [CL5] F. Caccavale, G. Ruggiero, B. Siciliano, L. VILLANI, “On the dynamics of a class of parallel robots”, in *Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarcic and M.M. Stanisic (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, 187–196, 2000.
- [CL4] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Quaternion-based impedance control for dual-robot cooperation”, in *Robotics Research: The Ninth International Symposium*, D. Koditschek and J. Hollerbach (Eds.), Springer-Verlag, London, UK, 45–52, 2000.
- [CL3] B. Siciliano, L. VILLANI, “Design of parallel force/position controllers and observers for robot manipulators”, in *Modelling and Control of Mechanical Systems*, A. Astolfi et al. (Eds.), Imperial College Press, London, UK, 203–218, 1997.
- [CL2] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Experiments of spatial impedance control” in *Experimental Robotics V*, Lecture Notes in Control and Information Sciences 232, A. Casals and A. T. de Almeida (Eds.), Springer Verlag, London, UK, 93–104, 1988.
- [CL1] L. VILLANI, B. Siciliano, C. Canudas de Wit, B. Brogliato, “Force/position control of a robot manipulator in contact with a compliant environment”, in *Advances in Robotics: The ERNET Perspective*, C. Bonivento, C. Melchiorri and H. Tolle (eds.), World Scientific, Singapore, 21–30, 1996.

Articoli in atti di congressi internazionali

- [CI50] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “An open control architecture for a cooperative robotic cell with advanced sensing capability”, *International Symposium on Collaborative Research in Applied Science*, Vancouver, Canada, Ott. 2005.

- [CI49] F. Caccavale, V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “RePLiCS: An environment for open real-time control of a dual-arm industrial robotic cell based on RTAI-Linux”, *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, Alberta, Canada, Ago. 2005.
- [CI48] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “An experimental setup for visual servoing applications on an industrial robotic cell”, *2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey, CA, Lug. 2005.
- [CI47] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Visual motion tracking with full adaptive extended Kalman filter: An experimental study”, *16th IFAC World Congress*, Praha, CZ, Lug. 2005.
- [CI46] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “An occlusion prediction algorithm for visual servoing tasks in a multi-arm robotic cell”, *6th IEEE Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Otaniemi, Finland, Giu. 2005.
- [CI45] A. De Santis, V. Caggiano, B. Siciliano, L. VILLANI, G. Boccignone “Anthropic inverse kinematics of robot manipulators in handwriting”, *12th Biennial Conference of the International Graphonomics Society*, Fisciano, I, Giu. 2005.
- [CI44] L. Celentano, B. Siciliano, L. VILLANI, “A robotic system for fire fighting in tunnels”, *2005 IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robots*, Kobe, Japan, Giu. 2005.
- [CI43] A. De Santis, B. Siciliano, L. VILLANI, “Fuzzy trajectory planning and redundancy resolution for a fire fighting robot operating in tunnels”, *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, E, Apr. 2005.
- [CI42] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Visual motion estimation of 3D objects: An adaptive extended Kalman filter approach”, *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, J, 957-962, 2004.
- [CI41] L. Celentano, B. Siciliano, L. VILLANI, “Design issues for a fire-fighting robot on tunnel intervention”, *International Conference on Mechatronics and Robotics*, Aachen, D, 2004.
- [CI40] L. Celentano, F. Garofalo, B. Siciliano, L. VILLANI, “A fire fighting robotic system for road and railway tunnels”, *2004 IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robots*, Bonn, D, 2004.
- [CI39] G. Antonelli, F. Caccavale, C. Sansone, L. VILLANI, “Fault diagnosis for AUVs using support vector machines”, *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, 4486-4491, 2004.
- [CI38] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Coping with occlusions in visual tracking of multiple objects”, *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, NV, 1530-1535, 2003.
- [CI37] G. Antonelli, F. Caccavale, L. VILLANI, “Adaptive discrete-time fault diagnosis for a class of nonlinear systems”, *2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Houston, TX, 667-672, 2003.
- [CI36] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Robust visual tracking using a fixed multi-camera system”, *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*,

- Taipei, Taiwan, ROC, 3333-3338, 2003.
- [CI35] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “A new technique for real-time visual tracking of 3D objects”, *7th IFAC Symposium on Robot Control*, Wroclaw, PL, 239-244, 2003.
- [CI34] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “A new method of image features pre-selection for real-time pose estimation based on Kalman filter”, *2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, CH, 372–377, 2002.
- [CI33] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Objects motion estimation via BSP tree modeling and Kalman filtering of stereo images”, *2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, 2968–2973, 2002.
- [CI32] F. Caccavale, L. VILLANI, “An impedance control strategy for cooperative manipulation”, *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Como, I, 343–348, 2001.
- [CI31] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Position and orientation estimation based on Kalman filtering of stereo images”, *2001 IEEE International Conference on Control Applications*, Mexico City, MEX, 702–707, 2001.
- [CI30] B. Siciliano, L. VILLANI, “Two-time scale force and position control of flexible manipulators”, *2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, KR, 2729–2734, 2001.
- [CI29] F. Caccavale, L. VILLANI, “Impedance control for multi-arm manipulation”, *39th IEEE Conference on Decision and Control*, Sydney, AUS, 3465–3470, 2000.
- [CI28] F. Caccavale, L. VILLANI, “Impedance control of cooperative manipulators”, *Controlo 2000*, Guimarães, P, 516–521, 2000.
- [CI27] G. Antonelli, F. Caccavale, S. Chiaverini, L. VILLANI, “Control of underwater vehicle-manipulator systems using only position and orientation measurements”, *6th IFAC Symposium on Robot Control*, Wien, Austria, 463–468, 2000.
- [CI26] F. Caccavale, G. Ruggiero, B. Siciliano, L. VILLANI, “Impedance control for a class of parallel robots”, *6th IFAC Symposium on Robot Control*, Wien, Austria, 385–390, 2000.
- [CI25] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Quaternion-based impedance control for dual-robot cooperation”, *9th International Symposium of Robotics Research*, Snowbird, UT, 42–49, 1999.
- [CI24] C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Robust hybrid force/position control with experiments on an industrial robot”, *1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Atlanta, GA, 956–960, 1999.
- [CI23] C. Natale, L. VILLANI, “Adaptive control of a robot manipulator in contact with a curved compliant surface”, *1999 American Control Conference*, San Diego, CA, 288–292, 1999.
- [CI22] F. Caccavale, L. VILLANI, “Output feedback tracking control for a class of mechanical systems”, *14th World Congress of IFAC*, Beijing, China, 245–250, 1999.
- [CI21] F. Caccavale, C. Natale, L. VILLANI, “Task space tracking control without velocity measurements”, *1999 IEEE Conference on Robotics and Automation*, Detroit, MI,

- 512–517, 1999.
- [CI20] C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Spatial impedance control of redundant manipulators”, *1999 IEEE Conference on Robotics and Automation*, Detroit, MI, 1788–1793, 1999.
- [CI19] G. Antonelli, F. Caccavale, S. Chiaverini, L. VILLANI, “An output feedback algorithm for position and attitude tracking control of underwater vehicles”, *1998 Conference on Decision and Control*, Tampa, FL, 4567–4572, 1998.
- [CI18] C. Natale, L. VILLANI, “Passivity-based design and experimental validation of adaptive force/position controllers for robot manipulators”, *1998 Conference on Decision and Control*, Tampa, FL, 427–432, 1998.
- [CI17] F. Caccavale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Quaternion-based impedance with nondiagonal stiffness for robot manipulators”, *1998 American Control Conference*, Philadelphia, PA, 468–472, 1998.
- [CI16] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Control of two industrial robots for parts mating”, *1998 IEEE International Conference on Control Application*, Trieste, I, 562–566, 1998.
- [CI15] C. Natale, B. Siciliano, L. VILLANI, “Control of moment and orientation for a robot manipulator in contact with a compliant environment” *1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Loeven, B, 1755–1760, 1998.
- [CI14] B. Siciliano, L. VILLANI, “Six-degree-of-freedom impedance robot control”, *8th International Conference on Advanced Robotics*, Monterey, CA, 387–392, 1997.
- [CI13] L. VILLANI, B. Siciliano, C. Canudas de Wit “Regulation of force and position for a robot manipulator in contact with a compliant environment”, *5th IFAC Symposium on Robot Control*, Nantes, F, 353–358, 1997.
- [CI12] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “Parallel force/position control with stiffness adaptation”, *1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, NM, 1136–1141, 1997.
- [CI11] B. Siciliano, L. VILLANI, “Parallel force/position controller with observer for robot manipulators”, *36th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, CA, 1335–1340, 1997.
- [CI10] F. Bruni, F. Caccavale, C. Natale, L. VILLANI, “Experiments of impedance control on an industrial robot manipulator with joint friction”, *1996 IEEE International Conference on Control Application*, Dearborn, MI, 205–210, 1996.
- [CI9] L. VILLANI, C. Canudas de Wit, B. Brogliato, “An exponentially stable adaptive force/position control for robot manipulators”, *13th IFAC World Congress*, San Francisco, CA, A, 7–12, 1996.
- [CI8] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “Parallel force/position control schemes with experiments on an industrial robot manipulator”, *13th IFAC World Congress*, San Francisco, CA, A, 25–30, 1996.
- [CI7] B. Siciliano, L. VILLANI, “A force/position regulator for robot manipulators without velocity measurements”, *1996 IEEE International Conference on Robotics and*

Automation, Minneapolis, MN, 2567–2572, 1996.

- [CI6] B. Siciliano, L. VILLANI, “A simple control strategy for a robot cart”, *1995 American Control Conference*, Seattle, WA, 2801–2802, 1995.
- [CI5] B. Siciliano, L. VILLANI, “A Lyapunov-stable adaptive scheme for force regulation and motion control of robot manipulators”, *5th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing*, Budapest, H, 311–316, 1995.
- [CI4] L. Sciavicco, B. Siciliano, L. VILLANI, “On dynamic modelling of gear-driven robot manipulators”, *4th IFAC Symposium on Robot Control*, Capri, I, 477–483, 1994.
- [CI3] B. Siciliano, L. VILLANI, “A passivity-based force/position control scheme for robot manipulators”, *1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, CA, 3265–3270, 1994.
- [CI2] B. Siciliano, L. VILLANI, “Force/position regulation of robot manipulators with gravity parameter adaptation”, *12th World Congress of IFAC*, Sydney, AUS, 7, 403–406, 1993.
- [CI1] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “A stable force/position controller for robot manipulators”, *31st IEEE Conference on Decision and Control*, Tucson, AZ, 1869–1874, 1992.

Articoli in atti di congressi nazionali

- [CN4] N. Grimaldi, V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Un laboratorio remoto per la didattica e l’addestramento al controllo di una cella industriale robotizzata”, *Convegno Didattica 2004 – Informatica per la Didattica*, Ferrara, 2004.
- [CN3] F. Caccavale, L. VILLANI, “Experiments of fault diagnosis for an industrial manipulator”, *46° Convegno Nazionale ANIPLA*, Milano, 2002.
- [CN2] V. Lippiello, B. Siciliano, L. VILLANI, “Stima di posizione e orientamento mediante elaborazioni di immagini con il filtro di Kalman”, *45° Convegno Nazionale ANIPLA*, Ancona, 192-197, 2001.
- [CN1] S. Chiaverini, B. Siciliano, L. VILLANI, “Sperimentazione di schemi di controllo dell’interazione su un robot industriale ad architettura di controllo aperta”, *41° Convegno Nazionale ANIPLA*, Torino, 543-554, 1997.

Altre pubblicazioni

- [T1] L. VILLANI, *Controllo parallelo in forza e posizione di robot manipolatori: teoria ed esperimenti*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica ed Informatica, Febbraio 1996.

Napoli, 30 maggio 2005

Luigi Villani