

Allegato A1

Roberto Zanasi

**Curriculum della propria
attività scientifica e didattica**

Modena, Ottobre 2003

Indice

1	Generalità	3
2	Attuale posizione	3
3	Posizioni precedentemente ricoperte	3
4	Formazione	5
5	Attività svolta	6
5.1	Attività scientifica	6
5.2	Attività didattica istituzionale	10
5.2.1	Incarichi ufficiali di insegnamento	10
5.2.2	Collaborazione ad attività didattica di insegnamenti ufficiali	11
5.3	Altre attività didattiche	12
5.4	Seminari di ricerca	13
5.5	Contratti di ricerca	14
5.6	Progetti di ricerca	15
5.7	Brevetti	16
5.8	Servizi prestati negli atenei	16
5.9	Organizzazione di eventi scientifici in sede nazionale e internazionale	17
5.10	Varie	17
6	Elenco delle 15 pubblicazioni presentate	19
7	Descrizione delle 15 pubblicazioni presentate	21
8	Pubblicazioni suddivise per categorie	27
8.1	A: 6 libri	27
8.2	B: 8 articoli su riviste internazionali	27
8.3	C: 3 capitoli di libri internazionali	28
8.4	D: 43 comunicazioni a congressi, simposi, workshops internazionali	28
8.5	E: 5 articoli su riviste a diffusione nazionale	32
8.6	F: 1 comunicazione a congressi, simposi, workshops nazionali	32
8.7	G: 9 rapporti interni	33
9	Sommari ragionati delle pubblicazioni	34
9.1	Simulazione di sistemi dinamici	34
9.2	Controllo Robusto - Sliding Mode con Azione Integrale	35
9.3	Modellistica di sistemi fisici: Power-Oriented Graphs	42
9.4	Generazione di traiettorie ottime	45
9.5	Problemi di controllo in ambito “automotive”	48
9.6	Altre tematiche di controllo	51

1 Generalità

Zanasi Roberto

Nato il 22 Aprile 1959 a Bomporto, Modena;
Residente in Via Bernini n. 1, c.a.p. 41030, Bomporto, Modena;
Telefono: (H) 059 901677, (W) 059 2056161;
E-mail: roberto.zanasi@unimo.it;
<http://www.dii.unimo.it/zanasi/zanasi.htm>.

2 Attuale posizione

Professore Associato Confermato

Settore Scientifico Disciplinare ING-INF/04 - Automatica;
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia;
Facoltà di Ingegneria, Sede di Modena.

Afferisce e lavora presso il: Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII)
Via Vignolese 905
41100 Modena, Italy
Tel: 059 2056161;
Fax: 059 2056129.

3 Posizioni precedentemente ricoperte

Nov. 2001 - oggi:

Professore Associato confermato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII) dell'Università di Modena e Reggio Emilia.

Nov. 1998 - Ott. 2001:

Professore Associato non confermato per 3 anni presso il Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria (DSI) dell'Università di Modena e Reggio Emilia.

Mar. 1997 - Ott. 1998:

Ricercatore confermato per 18 mesi per il settore scientifico disciplinare K04X (Automatica) presso il DEIS di Bologna.

Set. 1995:

Visiting Scientist per 1 mese presso l'**Université Catholique de Louvain**, Louvain-La-Neuve, **Belgium**, su invito del Prof. Raymond Gorez, per svolgere ricerche riguardanti l'uso di controllori nonlineari di tipo Sliding Mode per il controllo di posizione "point-to-point" di sistemi robotici. Questo periodo all'estero è stato finanziato con fondi della rete europea ERNET nell'ambito del programma Human Capital and Mobility.

Mar. 1994 - Feb. 1997:

Ricercatore non confermato per 3 anni per il settore scientifico disciplinare K04X (Automatica) presso il DEIS di Bologna.

Ott. 1993 - Feb. 1994:

Borsista per 5 mesi con borsa di studio CNR usufruita presso il DEIS di Bologna nell'ambito del Progetto Finalizzato "Robotica". Tematica generale "Applicazioni non industriali". Tematica specifica "Sistemi robotici avanzati".

Ott. 1992 - Set. 1993:

Borsista per 12 mesi con borsa di studio CNR usufruita presso il Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica (DEIS) di Bologna nell'ambito del Progetto Finalizzato "Robotica". Tematica generale "Controllo dei Robot". Tematica specifica "Tecniche di elaborazione per il controllo dei robot".

Feb. 1992 - Set. 1992:

Borsista per 8 mesi con borsa di Studio CNR per l'estero, usufruita presso l'Artificial Intelligence Lab., Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA, sotto la direzione del Dr. K. Salisbury. Durante questo periodo il candidato si è occupato di modellistica dinamica e simulazione di sistemi robotici, con particolare riferimento al sistema robotico "Whole Arm Manipulator", e su tale sistema ha sperimentato nuovi algoritmi di controllo robusto del tipo "Discontinuous Integral Control".

Ago. 1991 - Set. 1991:

Visiting Scientist per 2 mesi presso l'Artificial Intelligence Lab., Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA, su invito del Dr. K. Salisbury. Durante questo periodo ha sperimentato nuovi algoritmi di controllo robusto sul giunto Master del sistema robotico "Whole Arm Manipulator".

Aprile 1991:

Visiting Scientist per 1 mese presso l'International Research Institute for Management Sciences (IRIMS), Mosca, USSR, su invito dell'Accademico S. V. Eme-lyanov per svolgere ricerche riguardanti l'uso di controllori non lineari per la stabilizzazione di sistemi incerti.

Gen. 1989 - Dic. 1991:

Borsista per 3 anni iscritto al IV Ciclo del Dottorato di Ricerca in "Ingegneria dei Sistemi" erogato dal consorzio tra le Università di Bologna, Firenze e Padova e coordinato dal Prof. G. Marro.

1987 - 1989:

Collaboratore di Ricerca nell'ambito di una convenzione tra la società MARPOSS s.p.a. ed il DEIS dell'Università di Bologna.

4 Formazione

10 Dic. 1986:

Laureato con lode in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Bologna discutendo la tesi "Realizzazione di Algoritmi di Fast Fourier Transform su Digital Signal Processor Texas TMS32010". Relatore: Prof. A. Tonielli. Correlatori: Proff. C. Bonivento e C. Morandi.

11 Lug. 1992:

Dottore di Ricerca in "Ingegneria dei Sistemi" discutendo la Tesi "Controllo Discontinuo di Sistemi Dinamici con Applicazioni alla Robotica" riguardante alcuni sviluppi teorici sul controllo dei Sistemi a Struttura Variabile.

Aprile 1991:

1 mese di studio all'estero presso l'International Research Institute for Management Sciences (**IRIMS**), **Mosca**, USSR, su invito dell'Accademico S. V. Emelyanov per svolgere ricerche riguardanti la Teoria del Controllo Binario e l'uso di controllori non lineari per la stabilizzazione di sistemi incerti.

Ago. 1991 - Set. 1992:

10 mesi di studio all'estero, suddivisi in 2 periodi, presso l'Artificial Intelligence Lab., Massachusetts Institute of Technology (**MIT**), Cambridge, MA, **USA**, su invito del Dr. K. Salisbury. Durante questo periodo ha sperimentato nuovi algoritmi di controllo robusto sul giunto Master del sistema robotico "Whole Arm Manipulator".

Set. 1995:

1 mese di studio all'estero presso l'**Université Catholique de Louvain**, Louvain-La-Neuve, **Belgium**, su invito del Prof. Raymond Gorez per svolgere ricerche riguardanti l'uso di controllori nonlineari di tipo Sliding Mode per il controllo di posizione point-to-point di sistemi robotici.

5 Attività svolta

5.1 Attività scientifica

Temporalmente, l'attività scientifica del candidato può essere sostanzialmente suddivisa in due periodi distinti.

Il primo periodo, che va dal 1987 al 1998, si è svolto presso il DEIS dell'Università di Bologna e coincide, grossomodo, con i 3 anni del dottorato di ricerca, con i vari periodi di studio all'estero e con i 4 anni di attività come ricercatore. Durante questo periodo il candidato ha lavorato all'interno del gruppo di ricerca coordinato dal Prof. Claudio Bonivento e si è occupato di attività di riguardanti principalmente: la Simulazione di sistemi dinamici, la Teoria dei Sistemi a Struttura Variabile, la Teoria del Controllo Binario, la Modellistica e il Controllo di sistemi elettromeccanici con particolare riferimento ai Motori Elettrici e ai Sistemi Robotici. I contributi scientifici più significativi del candidato durante questo periodo, fatti in collaborazione anche con altri colleghi, hanno riguardato principalmente la simulazione di sistemi dinamici, la teoria del Controllo Binario e lo sviluppo della teoria dei Sistemi a Struttura Variabile con Azione Integrale. Un'attività che invece è stata promossa e sviluppata in modo autonomo dal candidato durante questo periodo è stata lo sviluppo di una nuova tecnica modellistica grafica, denominata "Power-Oriented Graphs", che il candidato ha poi diffusamente utilizzato nei suoi lavori scientifici. Un'altra attività di ricerca nata in questo periodo è stata quella dei Generatori di Traiettorie. Tale tematica, inizialmente promossa dal Prof. A. Tonielli, è stata poi sviluppata dal candidato sia in modo autonomo che in collaborazione con altri colleghi.

Il secondo periodo di ricerca, che va dal 1998 al 2003, coincide sostanzialmente con la presa di servizio del candidato presso l'Università di Modena e Reggio Emilia in qualità di Professore Associato. Durante questo periodo il candidato, nonostante abbia dovuto far fronte ad un pesante impegno didattico (essendo l'unico docente del raggruppamento di Automatica a Modena), si è impegnato nel cercare di attivare nuove linee di ricerca e nel far crescere nuove persone. In particolare, ha attivato numerose collaborazioni di ricerca con importanti aziende del comprensorio modenese (Ferrari, Case-New Holland, Coop. Bilanciai, ecc.) ed è stato Tutor di due dottorandi di ricerca (il Dott. Riccardo Morselli e il Dott. Germani Sandoni) che ha cercato di coinvolgere sulle sue attività di ricerca vecchie e nuove. Le collaborazioni di ricerca attivate hanno riguardato principalmente la modellistica e il controllo di sistemi elettromeccanici e in particolare il settore automotive. Una parte dei risultati scientifici ottenuti è già stata pubblicata in numerosi articoli, molti dei quali presentati in importanti conferenze internazionali. Altre attività di ricerca attualmente in atto (ad esempio, il controllo del beccheggio di un trattore o il controllo dell'assetto in curva di un'autovettura) hanno già dato buoni risultati pratici e saranno presto sottoposte a pubblicazione.

Nel complesso, le tematiche di ricerca maggiormente sviluppate dal candidato in questi due periodi sono state le seguenti:

- a) **Simulazione di sistemi dinamici.** In questo ambito, il candidato ha sviluppato e messo a punto un programma, denominato MICOSS, orientato alla simulazione di sistemi dinamici lineari, non lineari, a tempo-continuo e a tempo-discreto. Il programma permette di specificare non solo i parametri del sistema fisico da controllare,

ma anche quelli dei vincoli realizzativi e delle condizioni operative del dispositivo di controllo, quali per esempio l'aritmetica di elaborazione, il periodo di campionamento delle variabili, la commutazione dei segnali di attuazione, ecc. All'interno del programma sono presenti anche numerosi blocchi dedicati alla simulazione di sistemi di controllo di tipo PWM. Lo sviluppo di programmi simulativi del tipo Matlab/Simulink ha ormai reso obsolete le funzionalità grafiche del programma MICOSS, ma il lavoro svolto dal candidato nello sviluppo di questo programma gli ha permesso di maturare competenze specifiche nel settore della modellistica e della simulazione dei sistemi dinamici che lo ha portato successivamente allo sviluppo della tecnica modellistica denominata "Power-Oriented Graphs".

- b) **Controllo Robusto e Controllo Sliding Mode con Azione Integrale.** Lo studio comparato della teoria del Controllo Binario e della più diffusa teoria del Controllo Sliding Mode ha portato il candidato a sviluppare un nuovo regolatore non lineare che combina fra loro queste due tecniche di Controllo. L'algoritmo proposto è del tipo a Struttura Variabile con l'aggiunta originale di un'azione integrale non lineare che si dimostra essere efficace nello stimare i disturbi esterni agenti sul sistema. L'azione della parte integrale, unitamente alla presenza del termine switching di ampiezza piccola a piacere, permette di ottenere un comportamento globale molto "robusto" sia rispetto all'azione dei disturbi esterni che alle variazioni di parametri interni. Questa nuova tecnica di controllo, denominata Controllo Discontinuo con Azione Integrale, inizialmente è stata studiata e sviluppata per sistemi tempo-continui e poi successivamente è stata estesa anche al caso di sistemi tempo-discreti. In particolare, nel caso tempo-discreto sono state proposte nuove strutture di controllo robusto, sia di natura statica che adattativa, che sono in grado di assicurare una forte reiezione dei disturbi esterni garantendo contemporaneamente anche una buona riduzione del chattering presente all'interno del sistema. La tecnica sliding mode con azione integrale è stata anche utilizzata per progettare un regolatore non lineare con retroazione dall'uscita in grado di assicurare ad un sistema non lineare l'inseguimento asintotico di una traiettoria di riferimento. Questo tipo di regolatore non lineare può essere applicato sia a sistemi a fase minima che non minima. Questo tipo di controllo sliding mode con azione integrale è attualmente utilizzato con successo anche in alcuni importanti realizzazioni industriali in ambito automotive e motion control.
- c) **Modellistica matematica di sistemi fisici: Power-Oriented Graphs.** Lo studio delle problematiche di modellistica e simulazione dei sistemi dinamici ha portato il candidato a sviluppare particolari schemi a blocchi, denominati Power-Oriented Graphs (POG) che permettono un più diretto controllo dei flussi di potenza presenti all'interno del sistema fisico. Tali schemi sono particolarmente utili sia nella fase di modellazione del sistema, che nella fase di verifica della correttezza dei risultati simulativi. Tra le altre caratteristiche, alcuni degli aspetti interessanti di questi schemi a blocchi sono: a) una diretta corrispondenza tra i blocchi dello schema e gli elementi fisici reali; b) la possibilità di inversione ingresso-uscita del sistema senza modificare la struttura del grafo; c) la capacità di rappresentare sistemi fisici sia mono che multi-dimensionali; d) la possibilità di "trasformare" gli schemi

POG mediante l'utilizzo di semplici regole di trasformazione grafica; e) l'esistenza di un legame diretto tra la rappresentazione grafica POG e la corrispondente rappresentazione matematica nello spazio degli stati. f) la possibilità di "ridurre" lo schema POG originario ad uno schema POG semplificato mediante l'uso di opportune trasformazioni di "congruenza". Questa tecnica di modellistica grafica è stata sviluppata dal candidato in modo autonomo e originale. Peraltro, tale tecnica ha mostrato di avere forti affinità con un'altra tecnica modellistica, denominata "Bond-Graphs", sviluppata negli anni 60' negli Stati Uniti dal Prof. D.C. Karnopp. I principali vantaggi della tecnica POG rispetto a quella dei Bond-Graphs sono: 1) una rappresentazione grafica molto più semplice basata sull'utilizzo di semplici schemi a blocchi opportunamente strutturati; 2) un legame più semplice e diretto con la descrizione dinamica del sistema nello spazio degli stati; 3) una maggiore semplicità nella trasformazione e nella riduzione in forma minima dei sistemi dinamici presi in considerazione; 4) la possibilità di poter leggere e comprendere gli schemi a blocchi di tipo POG anche senza conoscere le caratteristiche di questa tecnica modellistica. Esempi di modellistica POG sono presenti in molti dei lavori scientifici del candidato, il quale ha utilizzato questa tecnica tutte le volte che si rendeva necessario descrivere in modo sintetico e chiaro il comportamento dinamico del sistema fisico oggetto della trattazione.

- d) **Generazione di traiettorie ottime.** Nella movimentazione e nel controllo dei sistemi elettromeccanici, svolge una funzione importante la determinazione di azioni di controllo in avanti e la scelta della traiettorie ottime da inseguire. In questo campo il candidato ha sviluppato particolari strutture dinamiche non lineari che automaticamente generano le traiettorie ottime "a tempo minimo" e "senza overshoot" compatibili con opportuni vincoli che possono essere imposti alle variabili di stato del sistema fisico in oggetto come, per esempio, la saturazione degli ingressi o il valore massimo ammissibile per variabili di stato del tipo: coppia, velocità, accelerazione, jerk, ecc. Inizialmente il generatore di traiettorie è stato sviluppato per sistemi del secondo ordine tempo-continuo e tempo-discreto. Successivamente è stato esteso anche al caso dei sistemi del terzo ordine sia tempo-continui che tempo-discreti. I risultati che si ritengono più significativi dell'attività di ricerca svolta in questo campo riguardano: 1) la determinazione della legge di controllo che nel caso dei sistemi tempo-discreti del terzo ordine garantisce l'inseguimento del segnale di riferimento in tempo minimo e senza overshoot. In questo caso si dimostra che il regolatore ottimo è costituito da un insieme numerabile di regolatori "lineari", ognuno dei quali è attivo in una particolare regione dello spazio degli stati; 2) la determinazione della legge di controllo che nel caso dei sistemi tempo-continui del terzo ordine garantisce tempo minimo e l'assenza di overshoot anche nel caso in cui siano presenti, contemporaneamente, dei vincoli sul valore massimo di velocità, accelerazione e jerk. In questo caso il regolatore presenta un'interessante struttura "nidificata" di tipo min-max. Si ritiene che i risultati ottenuti teoricamente in questo campo possano essere di notevole interesse, anche applicativo, nel campo del motion control.

- f) **Problemi di controllo in ambito “automotive”.** Negli ultimi anni il candidato ha attivato numerose collaborazioni di ricerca con importanti aziende che operano nel settore “automotive”, quali per esempio la Società Ferrari S.p.A. e la Società Case-New Holland Italia. Tali collaborazioni hanno portato il candidato ad approfondire numerose tematiche di controllo in questo settore. In particolare, sono state affrontate tematiche riguardanti il controllo di un sistema frizione, il controllo di coppia di un sistema di trasmissione, il controllo elettronico di un cambio marcia, il controllo attivo di una sospensione idraulica, di un servosterzo, di un differenziale, ecc. Queste attività di ricerca hanno portato alla pubblicazione di numerosi articoli, molti dei quali presentati a convegni internazionali, riguardanti la modellistica e il controllo di sistemi elettromeccanici. In questo ambito sono state utilizzate anche le competenze scientifiche maturate in altri settori. La tecnica modellistica “Power-Oriented Graphs” è stata estesamente utilizzata per descrivere in modo semplice e diretto il modello dinamico, quasi sempre non lineare, di tutti i sistemi elettromeccanici, anche complessi, presi in considerazione. Le competenze maturate con il programma di simulazione MICOSS e con lo studio dei sistemi a struttura variabile hanno permesso al candidato di risolvere efficacemente importanti problemi di simulazione di sistemi complessi a dimensione dinamica variabile, come per esempio il caso di frizioni con parastrappi, o parti meccaniche che interagiscono per mezzo di attrito statico. L’attività di ricerca svolta nell’ambito dei generatori di traiettorie ha permesso di giungere alla definizione di nuovi profili di accelerazione da dare all’autovettura in modo da ottenere un miglior comfort di guida durante i cambi marcia. Altre tematiche in questo campo che sono state oggetto di pubblicazioni sono le seguenti: 1) analisi delle strutture di controllo da utilizzare nei sistemi di tipo “steer-by-wire”; 2) modellistica dinamica e controllo di frizioni in bagno d’olio attuate in modo elettro-idraulico; 3) sensitività artificiale nel controllo elettronico del servosterzo per migliorare la sicurezza di guida.
- e) **Altre tematiche di controllo.** In parallelo alle attività di ricerca sopra descritte, il candidato si è occupato, in modo percentualmente meno significativo, anche di altre tematiche nel settore dei controlli. Tra queste è possibile segnalare: 1) lo sviluppo, in collaborazione con il Prof. G. Marro, di semplici “formule di inversione” che permettono la sintesi delle reti correttive di uso più comune (anticipatrice, ritardatrice e a ritardo e anticipo) in modo semplice e diretto. Uno degli aspetti più interessanti di queste formule di inversione è la loro chiara interpretazione geometrica sul piano complesso di Nyquist; 2) modellistica e controllo elettronico multifase di un sistema di illuminazione pubblica; 3) messa a punto di algoritmi per la compensazione degli effetti di isteresi in dispositivi per la misura delle forze e in particolare per le celle di carico. L’algoritmo non lineare di natura discreta messo a punto in questo ambito è diventato oggetto di un brevetto attualmente attivo a livello europeo.

5.2 Attività didattica istituzionale

5.2.1 Incarichi ufficiali di insegnamento

Tutti gli incarichi ufficiali di insegnamento sono stati svolti presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia. In particolare, gli insegnamenti ufficiali svolti nei vari anni accademici sono stati i seguenti:

2002-03:

- **Controlli Automatici A**. C.d.L.: Ing. Infor., Ing. Elett. e Ing. delle Telec.;
- **Controlli Automatici B**. C.d.L. in Ing. Elettronica;
- **Teoria dei Sistemi** (Supplenza). C.d.L.: Ing. Informatica, Ing. Elettronica;
- **Sistemi di Controllo Veicolo** (Supplenza). L. Spec. in Ing. del Veicolo.

2001-02:

- **Controlli Automatici**. C.d.L.: Ing. Informatica, Ing. Elettronica;
- **Teoria dei Sistemi** (Supplenza). C.d.L.: Ing. Informatica, Ing. Elettronica;
- **Fondamenti di Controlli Automatici** (Supp.). C.d.L. in Ing. Meccanica.

2000-01:

- **Controlli Automatici**. C.d.L. in Ing. Informatica e in Ing. Elettronica;
- **Controlli Automatici I e II** (Mutuato). D.U. in Ing. Informatica;
- **Teoria dei Sistemi** (Supplenza). C.d.L. in Ing. Informatica;

1999-00:

- **Controlli Automatici**. C.d.L. in Ing. Informatica e in Ing. Elettronica;
- **Controlli Automatici I e II** (Mutuato). D.U. in Ing. Informatica;
- **Teoria dei Sistemi** (Supplenza). C.d.L. in Ing. Informatica;

1998-99:

- **Controlli Automatici**. C.d.L.: Ing. Informatica, Ing. Elettronica;
- **Controlli Automatici I e II** (Mutuato). D.U. in Ing. Informatica;
- **Teoria dei Sistemi** (Supplenza). C.d.L. in Ing. Informatica;

1997-98:

- **Teoria dei Sistemi**. C.d.L. in Ing. Informatica e Automatica;

Indicativamente, il numero medio di studenti per insegnamento è stato il seguente:

Controlli Automatici	100 studenti;
Controlli Automatici I e II	40 studenti;
Controlli Automatici A	140 studenti
Controlli Automatici B	75 studenti
Teoria dei Sistemi	60 studenti;
Fondamenti di Controlli Automatici	40 studenti.
Sistemi di Controllo Veicolo	10 studenti.

5.2.2 Collaborazione ad attività didattica di insegnamenti ufficiali

Tutte le esercitazioni e i seminari svolti a supporto di incarichi di insegnamento ufficiali sono stati svolti presso le Facoltà di Ingegneria delle Università di Bologna (UNIBO) e di Modena e Reggio Emilia (UNIMO). In particolare, le attività svolte nei vari anni accademici sono state le seguenti:

1997-98:

- Esercitazioni di “Controlli Automatici”. Prof. G. Marro. ING-MEC, UNIBO.
- Tutore del modulo di “Controllo dei Processi”. DU-TELED, UNIBO.

1996-97:

- Esercitazioni di “Controlli Automatici”. Prof. G. Marro. ING-MEC, UNIBO.
- Esercitazioni di “Controlli Automatici I e II”. DU-INF-AUT, UNIMO.
- Tutore del modulo di “Controllo dei Processi”. DU-TELED, UNIBO.

1995-96:

- Esercitazioni di “Controlli Automatici”. Prof. G. Marro. ING-MEC, UNIBO.
- Esercitazioni di “Controlli Automatici I e II”. DU-INF-AUT, UNIMO.
- Tutore del modulo di “Controllo dei Processi”. DU-TELED, UNIBO.

1994-95:

- Esercitazioni di “Controlli Automatici”. Prof. C. Bonivento. ING-INF, UNIMO.
- Esercitazioni di “Controlli Automatici”. Prof. G. Marro. ING-MEC, UNIBO.
- Tutore del modulo di “Controllo dei Processi”. DU-TELED, UNIBO.

1993-94:

- Esercitazioni di “Controlli Automatici”. Prof. C. Bonivento. ING-INF, UNIMO.

1988-92:

- Esercitazioni di “Controllo dei Processi”. Prof. C. Bonivento. ING-INF, UNIBO;

Le attività sono state svolte all'interno dei seguenti percorsi formativi:

- ING-INF: Corso di Laurea in Ingegneria Informatica;
- ING-MEC: Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica;
- DU-INF-AUT: Diploma Universitario in Ingegneria Informatica e Automatica.
- DU-TELED: Diploma Universitario in Ingegneria Informatica e Automatica erogato in forma teledidattica dal Consorzio Nettuno.

5.3 Altre attività didattiche

Altre attività didattiche sono state svolte dal candidato presso aziende, all'interno di masters e a favore degli studenti. In particolare si segnala che:

Dall'A.A. 2000/01 in poi:

ha reso disponibile in rete, all'indirizzo "<http://www.dii.unimo.it/zanasi/zanasi.htm>", tutto il materiale didattico e informativo riguardante tutti gli insegnamenti di cui il candidato è docente. In particolare, sul sito sono disponibili: le dispense dei corsi, il programma svolto in aula giorno per giorno, gli esercizi svolti in aula, le esercitazioni svolte in laboratorio, alcuni compiti d'esame svolti, esercizi in preparazione dell'esame, i testi di riferimento, gli avvisi, le tesi disponibili e tutte le informazioni che il docente ritiene utile fornire agli studenti.

Nel 2001 e nel 2002:

ha svolto una serie di seminari (per un totale di circa 40 ore nel 2001 e 14 ore nel 2002) su "Approccio Sistemistico al Veicolo" nell'ambito del corso FSE Ob. 3 C.3 012755 RER "Master in Ingegneria del Veicolo", co-organizzato dalla Facoltà di Ingegneria, sede di Modena, presso il Democenter di Modena.

Nel 1999:

ha svolto una serie di seminari (per un totale di circa 30 ore) su "Fondamenti di Controlli Automatici" presso la Società New Holland S.p.A. di Modena.

Dal 1990 al 1999:

il candidato si è impegnato nel preparare materiale didattico che potesse essere di ausilio agli studenti nella preparazione dei vari insegnamenti di cui il candidato è stato docente e/o esercitatore. In particolare il candidato ha collaborato alla realizzazione dei seguenti libri di natura didattica:

- 1) R. Zanasi, "Esercizi di Controlli Automatici - Compiti d'esame svolti", Esculapio, Progetto Leonardo, Bologna 1999.
- 2) C. Bonivento, C. Melchiorri, A. Tonielli, R. Zanasi, "Controllo dei processi: schemi di lezione ed esercizi", Pitagora, Bologna, Gennaio 1996.
- 3) C. Bonivento, C. Melchiorri, R. Zanasi, "Sistemi di Controllo Digitale", Esculapio Editore, Collana: Progetto Leonardo, Bologna, Dicembre 1995.
- 4) C. Bonivento, A. Tonielli, R. Zanasi, "Simulazione di Sistemi Dinamici con Programma MICOSS", Pitagora Editrice Bologna, Gennaio 1990.

Nel Marzo - Aprile 1993:

è stato docente, per un totale di 42 ore di lezione, del modulo "Progetto di Sistemi di Controllo" nell'ambito del corso per "Tecnico di Automazione Industriale", organizzato dall'EnAIP di Rimini in collaborazione con il DEIS dell'Università di Bologna;

5.4 Seminari di ricerca

Ha tenuto, su invito, vari seminari di ricerca a livello nazionale e internazionale, illustrando i risultati del proprio lavoro di ricerca. I seminari più importanti sono stati i seguenti:

Nel 1999 e nel 2000: ha svolto due seminari (8 ore ciascuno) su tematiche di Controllo Robusto e Sliding Mode nell'ambito del Dottorato di Ricerca in "Ingegneria dei Sistemi" dell'Università di Bologna.

Nel Settembre 1997: ha tenuto un seminario dal titolo "Sistemi di Controllo Robusto (Controllo Binario e Sliding Mode)" all'interno del il Dottorato di Ricerca in "Ingegneria dei Sistemi", sedi consorziate di Bologna, Firenze e Padova.

Il 7 Aprile 1997: ha tenuto un seminario dal titolo "Nonlinear Filter for Smooth Trajectory Generator" presso "l'Institute of Info Theory and Automation" dell'Università di Praga su invito del Prof. Vladimir Kucera.

Il 27 Ottobre 1995: ha tenuto un seminario dal titolo "Controllo Robusto con Azione Integrale", Incontro Annuale dei Ricercatori MURST 40%, Facoltà di Ingegneria, Napoli.

Il 4 October 1995: ha tenuto un seminario dal titolo "Dynamic Modelling with Power-Oriented Graphs", Université Catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgium.

Il 18 Febbraio 1994: ha tenuto un seminario dal titolo "Power-Oriented Graphs", University of Twente, Netherlands.

Il 14 Gennaio 1993: ha tenuto un seminario dal titolo "Power-Oriented Graphs per la Modellistica di Sistemi Dinamici", DEIS, Università di Bologna.

Il 15 Luglio 1991: ha tenuto un seminario dal titolo "The Binary Control Theory: some basic concepts", AI Lab, MIT, Boston, MA.

Il 22 Aprile 1991: ha tenuto un seminario dal titolo "Control Activity for Robotic Systems at University of Bologna", IRIMS, Moscow.

Il 29 Gennaio 1991: ha tenuto un seminario dal titolo "Uncertain Systems Stabilization via Binary Control Approach", Politecnico di Milano. In collaborazione con il Dr. Ashot Nersisian.

Il 22 Gennaio 1991: ha tenuto un seminario dal titolo "Stabilizzazione di Sistemi Dinamici Incerti: Controllo Binario e Sistemi con Ritardo", Dipartimento di Matematica, Università di Bologna. In collaborazione con il Dr. Ashot Nersisian.

Il 24 Settembre 1990: ha tenuto un seminario dal titolo "Controllo con Calcolatore di Macchine e Processi" per la parte relativa all'utilizzo di strumenti di simulazione (MICOSS), ASTER, Bologna.

Il 30 Marzo 1990: ha tenuto un seminario dal titolo “Controllo Binario: Simulazione e Progettazione Assistita”, Incontro di Studio - Robotica, Università di Roma “La Sapienza”.

Nel periodo 1990-96: ha svolto una serie di seminari all’interno del Dottorato di Ricerca in “Ingegneria dei Sistemi”, sedi consorziate di Bologna, Firenze e Padova, e precisamente: “Introduzione ai Concetti del Controllo Binario” (ai dottorandi del V e VI ciclo), 8 Ottobre 1990 e 10 Ottobre 1991; “Sistemi di Controllo Robusto (Controllo Binario e Sliding Mode)”, (ai dottorandi del VII, VIII, IX e X ciclo) 29 Settembre 1992, e 27 Aprile 1993, 5 Luglio 1994 e 13 Luglio 1995.

14 Dicembre 1989: ha tenuto un seminario dal titolo “Controllo Binario e Sliding Mode: Teoria di Base e Progettazione Assistita”, Robotica - Seminari di ricerca, Bologna.

5.5 Contratti di ricerca

Nel seguito vengono elencati i contratti di ricerca di cui il candidato è stato responsabile scientifico per i Dipartimenti di Scienze dell’Ingegneria (DSI) e di Ingegneria dell’Informazione (DII) da quando ha preso servizio come professore associato presso l’Università di Modena e Reggio Emilia.

Nel 2003:

- Contratto di ricerca dal titolo “Caratterizzazione e Identificazione della Curva di trasmissibilità di una Frizione per Cambio Robotizzato”.
In collaborazione con la Società **Ferrari S.P.A.**, Maranello (MO).
- Contratto di ricerca dal titolo “Sviluppo di una applicazione per il controllo del beccheggio di un trattore agricolo a velocità specifiche”.
In collaborazione con la Società **CNH Italia S.p.A.** di Modena.
- Contratto di ricerca dal titolo “Modellistica dinamica di sistemi elettro-attuati per il controllo della trasmissione di veicoli stradali”.
In collaborazione con la Società **Digitek S.p.A.**, Concordia (MO)

Nel 2001:

- Contratto di ricerca dal titolo “Algoritmi ed elettronica digitale per celle di carico ad alta precisione - Terzo anno”.
In collaborazione con la Società **Coop. Bilanciai Campogalliano** (MO).

Nel 2000:

- Contratto di ricerca dal titolo “Studio di fattibilità e progetto ottimale di un sistema di conversione dell’energia elettrica per l’alimentazione di sistemi di illuminazione pubblica”. Progetto coordinato dal Prof. F. Fantini. Il candidato è stato responsabile della sola parte di controllo del progetto.
In collaborazione con la Società **Conchiglia S.p.A.** di Reggio Emilia.

- Contratto di ricerca dal titolo “Algoritmi ed elettronica digitale per celle di carico ad alta precisione - Secondo anno”.
In collaborazione con la Società **Coop. Bilanciai Campogalliano** (MO).
- Contratto di ricerca dal titolo “Modellistica dinamica del sistema di trasmissione di un'autovettura e controllo della coppia trasmessa”.
In collaborazione con la Società **Ferrari S.P.A.** di Maranello (MO).

Nel 1999:

- Contratto di ricerca dal titolo “Algoritmi ed elettronica digitale per celle di carico ad alta precisione - Primo anno”.
In collaborazione con la Società **Coop. Bilanciai Campogalliano** (MO).
- Contratto di ricerca dal titolo “Ottimizzazione dei profili di moto di un sistema di controllo assi azionato da motori passo-passo e brushless”.
In collaborazione con la Società **Sytech S.R.L.**, Funo di Argelato (BO).

5.6 Progetti di ricerca

Nel seguito vengono elencati i progetti di ricerca che il candidato ha promosso o a cui il candidato ha partecipato:

Dal 1998 al 2000: è stato promotore, in collaborazione con la Coop. Bilanciai Campogalliano, di un progetto di ricerca triennale dal titolo “Algoritmi ed elettronica digitale per celle di carico ad alta precisione” all'interno del **Progetto Finalizzato** “Materiali e Dispositivi per l'Elettronica dello Stato Solido II” (**MADESS II**), sottoprogetto “Sensori”, tematica “Sensori a stato solido”. Il progetto proposto è stato finanziato. In particolare, l'unità operativa di Modena, coordinata dal candidato, è stata finanziata mediante tre specifici contratti di ricerca riportati nella Sezione 5.5.

Dal 1998 al 1999: ha partecipato al **progetto PRIN** di durata biennale dal titolo “Sensori avanzati e tecniche di controllo per la manipolazione robotica”. Coordinatore: Prof. Salvatore Nicosia. Responsabile scientifico: Prof. Claudio Melchiorri. Impegno personale: 4 mesi/uomo per anno.

Nel 1999: ha promosso un **progetto biennale di ricerca applicata** dal titolo “Celle di carico elettroniche per sistemi di pesatura dinamica”. Il progetto, finanziato dall'Università di Modena e Reggio Emilia, è stato svolto in collaborazione con la Società Coop. Bilanciai Campogalliano (MO).

Nel 1999: ha avuto una **donazione** a supporto del progetto biennale di ricerca applicata dal titolo “Celle di carico elettroniche per sistemi di pesatura dinamica”. Società donatrice: Coop. Bilanciai Campogalliano.

Dal 2000 al 2001: ha partecipato al **progetto PRIN** di durata biennale dal titolo “Riconfigurazione del Controllo in Sistemi Fault-Tolerant”. Coordinatore: Prof. Edoardo Mosca. Responsabile scientifico: Prof. Claudio Bonivento. Impegno personale: 4 mesi/uomo per anno.

Dal 2001 al 2002: ha promosso **progetto di ricerca** dal titolo “Modellistica e Controllo dei Dispositivi di Trasmissione del Moto in un’Autovettura ad Elevate Prestazioni Dinamiche” finanziato dalla Società **Ferrari S.p.A.**, (MO). Sui fondi di questo progetto di ricerca è stata attivata una “borsa di ricerca e formazione avanzata” di durata biennale usufruita dal dottorando Germano Sandoni.

5.7 Brevetti

Il candidato è unico inventore del seguente **Brevetto Europeo**:

Title: “A Method For Compensating Hysteresis Effects In A Force Measuring Device”;

Patent Number: WO9857133;

Publication date: 1998-12-17;

Inventor(s): Zanasi Roberto (IT);

Applicant(s): Zanasi Roberto (IT); Cooperativa Bilanciai Campogalliano (IT);

(Questi dati sono anche reperibili in rete all’indirizzo “<http://ep.espacenet.com/>”).

Abstract del brevetto. A method for correcting the values measured by a force measuring device for the effects of a deviation from a straight line linearity due to hysteresis, between values of loads comprised between a minimum load and maximum load (NMax) applied thereto, with a given load progression history including values of loads comprised between said minimum load and said maximum load, comprises the steps of determining the value (IMax) of a maximum deviation from said straight line linearity; obtaining a linearity curve (Qc; QD) comprised between a known value of load (Xn-1) and one of said maximum and minimum values of load, said known value (Xn-1) of load being comprised between said maximum and minimum values of loads; obtaining a correction value (NC) of a measured value (NR) of load which is subsequent to said known value (Xn-1) in said given load progression history, said correction value being obtained on the basis of said linearity curve (Qc; QD) and said value (IMax) of a maximum deviation from linearity and adjusting said measured value (NR) using said correction value (NC), in order to obtain a corrected value (NCR) of the load measured.

5.8 Servizi prestati negli atenei

Dal settembre 2002: è **Responsabile Scientifico di un Master** di primo livello dal titolo “Responsabile di Commessa nella progettazione di impianti automatizzati”. Il master, inserito nel quadro del Programma Operativo Regione Emilia Romagna Obiettivo 3 Misura C3 “Formazione Superiore”, è stato attivato in collaborazione con l’Ente Gestore “IAL Emilia Romagna”.

Il Master si articola in 1500 ore complessive, di cui 518 ore di lezioni frontali e di didattica alternativa (esercitazioni, simulazioni, discussione di testimonianze di casi aziendali, project work, visite guidate), 442 ore riservate allo studio individuale e 510 ore di stage presso aziende convenzionate e qualificate. Attualmente i 13 studenti del Master stanno svolgendo lo stage presso le aziende. La prova finale del Master verrà svolta a metà gennaio 2004.

Nel 2002-2003: è stato il rappresentante dalla Facoltà di Ingegneria di Modena all'interno del Comitato Tecnico Scientifico di un **corso IFTS** rif. P.a. 122/ rer/03, proposto dal Consorzio FIT, dal titolo Tecnico Superiore Di Cantiere -System Integrator nel Settore della Domotica. Nei giorni 16, 22 e 23 Settembre 2003 è stato membro della commissione giudicatrice per l'esame finale del corso.

Nel 1999: è stato membro della commissione esaminatrice per l'**abilitazione alla professione di Ingegnere** all'Università di Modena e Reggio Emilia.

Da 1998 ad oggi: è stato **relatore di numerose Tesi di Laurea** (circa 40) presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Modena e Reggio Emilia. La lista delle tesi svolte è reperibile in rete all'indirizzo: <http://www.dii.unimo.it/zanasi/Personale/TesiSvolteZanasi.html>. Quasi tutte le Tesi di Laurea sono state svolte in collaborazione con aziende del comprensorio industriale Modenese e Bolognese (Coop. Bilanciai Campogalliano, Ferrari S.p.A., New Holland, Tetrapak, DataLogic, SyTech, Conchiglia, ecc.) su tematiche principalmente nell'area dei controlli automatici, della modellistica dinamica e del controllo robusto di sistemi elettromeccanici.

Nel 1995: è stato membro della commissione esaminatrice per l'**abilitazione alla professione di Ingegnere** alla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna.

5.9 Organizzazione di eventi scientifici in sede nazionale e internazionale

Luglio 1997: ha organizzato, in collaborazione con il Prof. Raymond Gorez (Université de Louvain), una **Invited Session** dal titolo "High-Order and Discrete-Time Sliding Mode Control" all'interno dell'European Control Conference (**ECC'97**) tenutosi a Brussels dal 1 al 4 Luglio 1997.

Luglio 2003: è stato **membro dell'International Scientific Committee** del Congresso "**MECH2K3: Second International Congress on Mechatronics**", tenutosi dal 14 al 17 luglio 2003 a Graz in Austria (vedi <http://129.27.94.3/mech2k3/>).

Settembre 2003: è stato **responsabile dell'organizzazione del Convegno C.I.R.A. 2003** tenutosi dal 10 al 12 Settembre 2003 presso la Facoltà di Ingegneria, sede di Modena, dell'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia. Ha inoltre partecipato attivamente all'organizzazione delle seguenti due iniziative speciali del Convegno: 1) "**Problemi di controllo in ambito Automotive**" in collaborazione con C. Rossi e F. Vasca; 2) "**Poster Session per Dottorandi e Dottori di Ricerca**" in collaborazione con M. Di Bernardo e L. Giarrè.

5.10 Varie

Dal 1999 al 2001 è stato **il tutor scientifico** per il settore "Automatica" di **2 studenti del Dottorato di Ricerca in "Ingegneria dell'Informazione"** (I Ciclo

nuova serie) dell'Università di Modena e Reggio Emilia. Gli studenti sono:

1) **Riccardo Morselli**, vincitore di una delle borse di studio del dottorato. Il 14 Febbraio 2003 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca discutendo una tesi dal titolo "Nonlinear trajectory generators for motion control systems" di cui il candidato è stato Tutor;

2) **Germano Sandoni**, vincitore del dottorato, ma senza borsa di studio. Ha usufruito di una "borsa di ricerca e formazione avanzata" finanziata su fondi di ricerca forniti dalla Società Ferrari S.p.A. Il 14 Febbraio 2003 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca discutendo una tesi dal titolo "Modeling and control of a car driveline" di cui il candidato è stato Tutor;

Nel Maggio 1996 in collaborazione con i Proff. C. Bonivento e G. Marro è stato **editore del libro "Colloquium on Automatic Control"**, Springer, preparato per sottolineare i 50 anni di attività di ricerca riguardanti i Controlli Automatici presso l'Università degli Studi di Bologna e comprendente scritti di K.J. Astrom, A. Isidori, E. Mosca, G. Marro, C. Maffezzoni, G. Magnani, C. Bonivento e R. Zanasi.

Nel Settembre 1995 è stato invitato ad essere **membro di commissione d'esame di una Tesi di Dottorato** dal titolo "Sliding Mode Control of Robot Manipulators" presentata dal Dr. Y.-L. Hsu presso l'Université Catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgio.

Dal 1992 è stato **"technical reviewer"** per riviste e convegni internazionali. In particolare si segnalano le seguenti riviste:

- Automatica;
- IEEE Transactions on Automatic Control";
- IEEE Transactions on Circuits and Systems;
- IEEE Transactions on Control Systems Technology;
- IEEE Transactions on Industrial Electronics;
- IEEE Transactions on Robotics and Automation;
- Robotics and System Dynamics;
- Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control;
- System and Control Letters;

e i seguenti convegni interazionali:

- World Congress IFAC;
- American Control Conference - ACC;
- European Control Conference - ECC;
- Conference on Decision and Control - CDC;
- IEEE Conference on Industrial Electronics - IECON;
- Symposium on Robot Control - SYROCO;
- IEEE Conference on Robotics and Automation;

6 Elenco delle 15 pubblicazioni presentate

- [1] R. Zanasi, "Sliding Mode Using Discontinuous Control Algorithms of Integral Type", **Int. Journal of Control**, Special Issue on Sliding Mode Control, V. I. Utkin, Guest Ed., vol. 57, no. 5, pp. 1079-1099, 1993, (B).
- [2] A. Nersisyan, R. Zanasi, "A Modified Variable Structure Control Algorithm for Stabilization of Uncertain Dynamical Systems", **Int. J. of Robust and Nonlinear Control**, M. Grimble, Ed.-in-Chief, vol. 3, Ottobre 1993, pp. 199-209, (B).
- [3] C. Bonivento, C. Melchiorri, R. Zanasi, "Robust Binary Control of Robotic Systems", invited paper in "**Systems, Models and Feedback: Theory and Applications**", (A. Isidori and T.J. Tarn Eds), Birkhauser, Boston, pp. 1-15, 1992, (C).
- [4] C. Bonivento, A. Nersisyan, A. Tonielli, R. Zanasi, "A Cascade Structure For Robust Control Design", **IEEE Trans. on Automatic Control**, vol. 39, no. 4, pp. 846-849, Aprile 1994, (B).
- [5] C. Bonivento, R. Zanasi, "Advances in Variable Structure Control", in **Colloquium on Automatic Control**, (C. Bonivento, G. Marro and R. Zanasi Eds), pp. 178-226, Springer, Maggio 1996, (C).
- [6] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, "Discrete Variable Structure Integral Controllers", **Automatica**, vol. 34, no. 3, pp. 355-361, 1998, (B).
- [7] C. Bonivento, L. Marconi, R. Zanasi, "Output Regulation of Nonlinear Systems by Sliding Mode", **Automatica**, vol. 37, no. 4, pp. 535-542, 2001, (B).
- [8] R. Gorez, R. Zanasi, G. Antonelli, Y.L. Hsu, "Sliding Mode Control of Robot Manipulators", in **Advances in Robotics - The ERNET perspective**, Bonivento C., Melchiorri C., Tolle H. (eds.), World Scientific Publishing, pp. 87-96, Settembre 1996, (C).
- [9] R. Zanasi, C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, "Nonlinear Filter for the Generation of Smooth Trajectories", **Automatica**, vol. 36, pp. 439-448, 2000, (B).
- [10] C. Guarino Lo Bianco, R. Zanasi, "Smooth profile generation for a tile printing machine", **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, vol. 50, n. 3, pp. 471-477, June 2003, ISSN 0278-0046 (B).
- [11] R. Zanasi, R. Morselli, "Discrete Minimum Time Tracking Problem for a Chain of Three Integrators with Bounded Input", **Automatica**, vol. 39, pp. 1643-1649, 2003, SSN: 0005-1098, (B).
- [12] R. Zanasi, R. Morselli, "Third Order Trajectory Generator Satisfying Velocity, Acceleration and Jerk Constraints", **IEEE CCA/CACSD 2002 Conference**, Glasgow, Scozia, pp. 1165-1170, 18-20 September 2002, ISBN: 0-7803-7387-1, (D).

- [13] R. Zanasi, R. Morselli, “Second Order Smooth Trajectory Generator with Non-linear Constraints”, European Control Conference - **ECC’01**, Porto, Portugal, pp. 1518-1523, 4-7 September 2001, ISBN: 972-752-047-2, (D).
- [14] R. Zanasi, R. Morselli, G. Sandoni, “Simulation of Variable Dynamic Dimension Systems: the Clutch Example”, European Control Conference - **ECC’01**, Porto, Portugal, pp. 3149-3154, 4-7 September 2001, ISBN: 972-752-047-2, (D).
- [15] R. Zanasi, “Dynamics of a n -links Manipulator by Using Power-Oriented Graphs”, Symposium on Robot Control - **SYROCO’94**, pp. 535-542, Capri, 19-21 Settembre 1994, (D).

7 Descrizione delle 15 pubblicazioni presentate

- [1] R. Zanasi, "Sliding Mode Using Discontinuous Control Algorithms of Integral Type", **Int. Journal of Control**, Special Issue on Sliding Mode Control, V. I. Utkin, Guest Ed., vol. 57, no. 5, pp. 1079-1099, 1993, (B).
- [2] A. Nersisian, R. Zanasi, "A Modified Variable Structure Control Algorithm for Stabilization of Uncertain Dynamical Systems", **Int. J. of Robust and Nonlinear Control**, M. Grimble, Ed.-in-Chief, vol. 3, Ottobre 1993, pp. 199-209, (B).

Gli articoli [1] e [2] si occupano della stabilizzazione robusta di sistemi dinamici tempo-continui in presenza di variazioni parametriche e di disturbi esterni tempo-varianti. In particolare, nei due articoli si propone e si analizza il comportamento dinamico di un nuovo controllore a struttura variabile all'interno del quale è stato inserito un nuovo termine non lineare di tipo integrale mediante il quale è possibile ottenere una reiezione completa dei disturbi esterni anche nel caso in cui il termine discontinuo di controllo abbia un'ampiezza inferiore a quella del disturbo. Questo risultato, non ottenibile con i normali controllori a struttura variabile di tipo "statico", richiede come vincolo che i disturbi esterni abbiano derivata limitata. Il nuovo tipo di controllore, denominato "controllo discontinuo con azione integrale", ha una struttura particolarmente semplice e simile a quella di un regolatore PID: i parametri di progetto sono infatti l'ampiezza k della componente discontinua, il coefficiente λ della parte proporzionale e il coefficiente h della parte integrale non-lineare.

Nell'articolo [2] viene fornita, in funzione dei parametri di progetto k , λ ed h , una prima condizione sufficiente che garantisce la globale e asintotica stabilità del sistema retroazionato. In questo articolo viene inoltre mostrato come la nuova struttura di controllo possa essere considerata come un caso particolare della più generale (e più complessa) teoria del Controllo Binario sviluppata negli anni 80' dall'Accademico russo Emelyanov.

Nell'articolo [1] viene proposta una più semplice ed efficace condizione sufficiente per garantire la globale e asintotica stabilità del sistema retroazionato. Inoltre, in questo articolo viene studiato il problema di come mantenere il sistema in sliding mode anche nel caso in cui i disturbi esterni siano "discontinui". Si dimostra che in questo caso oltre all'azione del termine integrale deve essere presente anche un termine discontinuo di ampiezza adeguata.

- [3] C. Bonivento, C. Melchiorri, R. Zanasi, "Robust Binary Control of Robotic Systems", invited paper in "**Systems, Models and Feedback: Theory and Applications**", (A. Isidori and T.J. Tarn Eds), Birkhauser, Boston, pp. 1-15, 1992, (C).

Nell'area del controllo robusto, la teoria del controllo a Struttura Variabile e la teoria del Controllo Binario hanno interessanti proprietà metodologiche, ma presentano spesso anche alcuni inconvenienti applicativi. Tra i principali svantaggi di queste due tecniche vi è l'insorgere di chattering indesiderato nelle realizzazioni pratiche delle leggi di controllo a Struttura Variabile, e la presenza di oscillazioni

continue, spesso poco smorzate, nelle applicazioni dove si utilizza il Controllo Binario. In [3] vengono presentati e discussi i risultati sperimentali ottenuti applicando una nuova tecnica di controllo robusto ad un particolare sistema robotico. Il principale vantaggio della tecnica di controllo proposta, basata su di un regolatore Sliding Mode con l'aggiunta di un'azione integrale di tipo switching, è quella di ottenere una riduzione arbitraria del fenomeno chattering, pur mantenendo le proprietà di robustezza dell'approccio Sliding Mode. I risultati sperimentali presentati nell'articolo sono stati ottenuti dal candidato applicando la tecnica proposta al sistema robotico WAM (Whole-Arm Manipulator) del Prof. Ken Salisbury presso l'Artificial Intelligence Lab., Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA.

- [4] C. Bonivento, A. Nersisyan, A. Tonielli, R. Zanasi, "A Cascade Structure For Robust Control Design", **IEEE Trans. on Automatic Control**, vol. 39, no. 4, pp. 846-849, Aprile 1994, (B).

In [4] vengono studiate le caratteristiche dinamiche di una struttura di controllo in cascata che utilizza un controllo a Struttura Variabile nell'anello interno e un Controllo Binario nell'anello esterno. Entrambi i tipi di controllo sono robusti rispetto ai disturbi esterni e alle variazioni parametriche. Il vantaggio di utilizzare un controllo binario nell'anello esterno risiede nel fatto che il segnale di controllo da esso fornito all'anello interno è strutturalmente continuo e quindi non pregiudica la robustezza del controllo a struttura variabile presente nell'anello interno. La tecnica di controllo proposta viene prima analizzata teoricamente e poi applicata in simulazione ad un caso particolare: il controllo di un motore in corrente continua collegato ad un carico fortemente non lineare.

- [5] C. Bonivento, R. Zanasi, "Advances in Variable Structure Control", in **Colloquium on Automatic Control**, (C. Bonivento, G. Marro and R. Zanasi Eds), pp. 178-226, Springer, Maggio 1996, (C).

In [5] viene presentata una serie di risultati ottenuti nel campo del controllo robusto dei sistemi fisici. In particolare, l'articolo si sofferma sulla metodologia del Controllo Discontinuo con Azione Integrale nelle due versioni tempo-continua e tempo-discreta. Nell'articolo sono presenti numerosi esempi applicativi di questa tecnica. Alcuni di questi sono simulativi, mentre altri descrivono applicazioni pratiche fisicamente realizzate, come ad esempio il controllo di velocità di un motore elettrico soggetto ad un forte disturbo di coppia sul carico ed il controllo di posizione del giunto master di un sistema robotico.

- [6] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, "Discrete Variable Structure Integral Controllers", **Automatica**, vol. 34, no. 3, pp. 355-361, 1998, (B).

In [6] vengono studiate le caratteristiche dinamiche del Controllo Discontinuo con azione Integrale (DIC) nel caso tempo-discreto. Nell'articolo viene proposta una versione discreta del controllo DIC opportunamente modificata per tener conto delle informazioni che sono disponibili sulla derivata temporale della variabile di

controllo. Questo tipo di controllore discreto risulta essere molto efficace nella riduzione del chattering nel caso in cui i parametri del sistema siano noti. Nell'articolo viene proposta e analizzata anche una struttura di controllo "adattativa" che permette di stimare efficacemente le variazioni parametriche di tipo "inerziale" che si hanno all'interno del sistema. La locale e asintotica stabilità del sistema retroazionato viene dimostrata nel caso di disturbi esterni costanti. Il controllore proposto viene poi utilizzato in simulazione per controllare un motore in corrente continua collegato ad una carico inerziale tempo-variante.

- [7] C. Bonivento, L. Marconi, R. Zanasi, "Output Regulation of Nonlinear Systems by Sliding Mode", **Automatica**, vol. 37, no. 4, pp. 535-542, 2001, (B).

L'articolo [7] prende in considerazione il progetto di un regolatore sliding mode con retroazione dall'uscita in grado di assicurare ad un sistema non lineare l'inseguimento asintotico di una traiettoria di riferimento. Si fa l'ipotesi che la traiettoria di riferimento venga generata da un sistema esterno neutralmente stabile il cui stato deve essere noto. La metodologia di progetto proposta nell'articolo è basata sulla teoria del "center manifold" e sul concetto di "controllo equivalente". Tale metodologia può essere applicata sia a sistemi a fase minima che non minima.

- [8] R. Gorez, R. Zanasi, G. Antonelli, Y.L. Hsu, "Sliding Mode Control of Robot Manipulators", in **Advances in Robotics - The ERNET perspective**, Bonivento C., Melchiorri C., Tolle H. (eds.), World Scientific Publishing, pp. 87-96, Settembre 1996, (C).

Nell'articolo [8] il controllo Sliding Mode viene applicato al controllo di posizione "point-to-point" di un manipolatore robotico. Nell'articolo viene proposto l'utilizzo di una semplice superficie di sliding, funzione non lineare degli errori di posizione, mediante la quale è possibile ottenere dei comportamenti "smooth" della variabile controllata mantenendo nel contempo limitata la velocità massima ammissibile. La comparsa di chattering nel sistema viene evitata utilizzando una funzione di tipo "saturazione" al posto della funzione "segno". Il raggiungimento esatto delle posizione finale viene garantita dall'aggiunta di un termine integrale all'interno delle legge di controllo. La tecnica proposta viene utilizzata per controllare il primo giunto di un sistema robotico industriale (Kuka 316). I dati sperimentali confermano i risultati teorici ottenuti.

- [9] R. Zanasi, C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, "Nonlinear Filter for the Generation of Smooth Trajectories", **Automatica**, vol. 36, pp. 439-448, 2000, (B).

Nell'articolo [9] viene presentato un nuovo generatore di traiettorie, basato su di un controllore non lineare a struttura variabile, particolarmente utile per la generazione di traiettorie nel campo del "motion control". Tale sistema è in grado di "filtrare" i tipici segnali di riferimento (gradino, rampa, ecc.) fornendo in uscita un segnale che soddisfa alcuni vincoli, definibili a piacere dall'utente, sulle derivate temporali massime e minime della traiettoria desiderata. Tali vincoli possono essere modificati in linea durante il normale funzionamento del sistema senza pregiudicare la stabilità e la funzionalità del sistema. Si dimostra inoltre che la traiettoria

generata è quella che garantisce una transizione “in tempo minimo” e senza “overshoot”. Il generatore di traiettorie considerato è quello del secondo ordine e viene analizzato sia nella versione tempo-continua che tempo-discreta. Il principale contributo del lavoro riguarda il caso tempo-discreto: si dimostra che il controllore discreto a tempo minimo è dato da una collezione di regolatori “lineari”, ognuno dei quali è attivo in una particolare regione del piano delle fasi. Le caratteristiche del generatore proposto vengono verificate in simulazione facendo riferimento ad un caso pratico di inseguimento di un segnale a dente di sega nel controllo di un utensile che opera su di una linea di assemblaggio.

- [10] C. Guarino Lo Bianco, R. Zanasi, “Smooth profile generation for a tile printing machine”, **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, vol. 50, n. 3, pp. 471-477, June 2003, ISSN 0278-0046 (B).

L’articolo [10] descrive l’utilizzo di un generatore di traiettorie del secondo ordine, del tipo di quello proposto in [9], nel caso di un’applicazione reale di controllo di una macchina per la stampa di piastrelle posizionate in modo non regolare su di una linea di trasporto in movimento. Nell’articolo vengono riportati sia dei risultati teorici, riguardanti principalmente la gestione a tempo minimo delle condizioni iniziali che non rispettano i vincoli voluti, sia dei risultati sperimentali ottenuti durante il reale funzionamento della macchina.

- [11] R. Zanasi, R. Morselli, “Discrete Minimum Time Tracking Problem for a Chain of Three Integrators with Bounded Input”, **Automatica**, vol. 39, pp. 1643-1649, 2003, SSN: 0005-1098, (B).

L’articolo [11] estende al caso tridimensionale i risultati teorici che in [9] erano stati ottenuti per il generatore di traiettorie bidimensionale a tempo-discreto. Nonostante la maggiore complessità del problema, nell’articolo si mostra come mediante l’utilizzo di particolari trasformazioni nello spazio degli stati sia possibile ottenere un regolatore discreto che, pur mantenendo una struttura estremamente semplice, garantisce l’inseguimento perfetto del segnale di riferimento in “tempo minimo” e “senza sovraelongazione”. Nell’articolo si dimostra che anche per il caso tridimensionale il regolatore discreto a tempo minimo è costituito da un insieme numerabile di regolatori “lineari”, ognuno dei quali è attivo in una particolare regione dello spazio degli stati. Le superfici che delimitano queste regioni hanno delle proprietà estremamente interessanti che nell’articolo sono state evidenziate con particolare attenzione. Risultati simulativi confermano la correttezza dei risultati teorici presentati.

- [12] R. Zanasi, R. Morselli, “Third Order Trajectory Generator Satisfying Velocity, Acceleration and Jerk Constraints”, **IEEE CCA/CACSD 2002 Conference**, Glasgow, Scozia, pp. 1165-1170, 18-20 September 2002, ISBN: 0-7803-7387-1, (D).

L’articolo [12] estende al caso tridimensionale l’analisi del generatore di traiettorie del secondo ordine a “tempo-continuo”. In particolare si determina la struttura di un nuovo regolatore che garantisce il perfetto inseguimento dei segnali di

riferimento, in “tempo minimo” e “senza overshoot”, anche nel caso di vincoli contemporanei sulla velocità $V_{min} \leq \dot{x} \leq V_{max}$, sull’accelerazione $A_{min} \leq \ddot{x} \leq A_{max}$ e sul jerk $|\dddot{x}| \leq U$. Come caso particolare si ottiene anche la struttura del generatore di traiettorie del secondo ordine quando siano presenti vincoli sulla velocità e sull’accelerazione.

- [13] R. Zanasi, R. Morselli, “Second Order Smooth Trajectory Generator with Non-linear Constraints”, European Control Conference - **ECC’01**, Porto, Portugal, pp. 1518-1523, 4-7 September 2001, ISBN: 972-752-047-2, (D).

In [13] viene presentato un generatore di traiettorie tempo-continuo del secondo ordine che è in grado di garantire l’inseguimento senza overshoot dei segnali di riferimento nel caso in cui si abbiano vincoli “non lineari” sia sulla massima accelerazione, $|\ddot{x}| \leq U_M(\dot{x})$, che sulla massima velocità, $\dot{x}_{M-} \leq \dot{x} \leq \dot{x}_{M+}$. L’introduzione di un opportuno boundary-layer non lineare nelle vicinanze della curva teorica di commutazione permette di garantire che l’azione di controllo è sempre “continua”. Quando l’ampiezza di questo “boundary layer” tende a zero, l’azione di controllo diventa discontinua e la traiettoria generata dal sistema diventa quella a tempo minimo.

- [14] R. Zanasi, G. Sandoni, R. Morselli, “Simulation of Variable Dynamic Dimension Systems: the Clutch Example”, European Control Conference - **ECC’01**, Porto, Portugal, pp. 3149-3154, 4-7 September 2001, ISBN: 972-752-047-2, (D).

L’articolo [14] prende in considerazione i sistemi a struttura dinamica variabile, cioè i sistemi che cambiano la dimensione del vettore di stato durante il loro normale funzionamento. La simulazione di questo tipo di sistemi è tipicamente difficoltosa perchè richiede una continua gestione di più modelli simulativi, delle relative condizioni iniziali e delle politiche di passaggio da un modello all’altro. Nell’articolo viene proposto un particolare modo di rappresentare i sistemi a struttura dinamica variabile che ne facilita la simulazione in tutte le condizioni operative. Il metodo viene presentato facendo riferimento ad un sistema di n masse che interagiscono tra di loro solo tramite attriti coulombiani. La trasformazione di coordinate che viene proposta tende a separare la “dinamica principale” del sistema, cioè quella che è sempre attiva, da tutte quelle “relative”, cioè quelle che scompaiono quando la dimensione dinamica del sistema decade. La politica di passaggio da una condizione dinamica all’altra viene gestita calcolando il controllo equivalente di un opportuno sistema multidimensionale a struttura variabile. Nell’articolo, il metodo proposto viene applicato alla simulazione di un sistema composto da quattro masse.

- [15] R. Zanasi, “Dynamics of a n -links Manipulator by Using Power-Oriented Graphs”, Symposium on Robot Control - **SYROCO’94**, pp. 535-542, Capri, 19-21 Settembre 1994, (D).

Nell’articolo [15], la tecnica modellistica “Power-Oriented Graphs” (POG) viene utilizzata per ricavare le equazioni dinamiche non lineari di un manipolatore robotico a n gradi di libertà. Prima si determina il modello dinamico del manipolatore

“elastico” che si ottiene quando nei giunti vengono inserite delle elasticità. Successivamente si determina il modello dinamico del manipolatore “rigido” facendo tendere a zero le elasticità inserite nei giunti. Utilizzando le particolari proprietà strutturali della tecnica modellistica “Power-Oriented Graphs” si dimostra che la riduzione al caso “rigido” può essere ottenuta facilmente utilizzando una trasformazione di congruenza nello spazio degli stati. Tale trasformazione è di tipo rettangolare e permette di trasformare e ridurre il sistema contemporaneamente. Il modello dinamico “rigido” che si ottiene in questo modo ha una struttura interna molto simile a quella che si ottiene utilizzando l’approccio a “operatori spaziali”. Il vantaggio di utilizzare la tecnica POG è quello di mettere in evidenza anche tutti i flussi di potenza che si hanno all’interno del manipolatore.

8 Pubblicazioni suddivise per categorie

8.1 A: 6 libri

- [1] R. Zanasi, “**Esercizi di Controlli Automatici - Compiti d’esame svolti**”, Esculapio, Progetto Leonardo, Bologna 1999, (A).
- [2] C. Bonivento, G. Marro, R. Zanasi (Eds), “**Colloquium on Automatic Control**”, Springer, Maggio 1996, ISBN 3540760601, (A).
- [3] C. Bonivento, C. Melchiorri, A. Tonielli, R. Zanasi, “**Controllo dei processi: schemi di lezione ed esercizi**”, Pitagora, Bologna, Gennaio 1996, (A).
- [4] C. Bonivento, C. Melchiorri, R. Zanasi, “**Sistemi di Controllo Digitale**”, Esculapio Editore, Collana: Progetto Leonardo, Bologna, Dicembre 1995, (A).
- [5] R. Zanasi, “Controllo Discontinuo di Sistemi Dinamici con Applicazioni alla Robotica”, **Tesi di Dottorato**, DEIS, Università di Bologna, Febbraio 1992, (A).
- [6] C. Bonivento, A. Tonielli, R. Zanasi, “**Simulazione di Sistemi Dinamici con Programma MICOSS**”, Pitagora Editrice Bologna, Gennaio 1990, (A).

8.2 B: 8 articoli su riviste internazionali

- [7] R. Zanasi, R. Morselli, “Discrete Minimum Time Tracking Problem for a Chain of Three Integrators with Bounded Input”, **Automatica**, vol. 39, pp. 1643-1649, 2003, SSN: 0005-1098, (B).
- [8] C. Guarino Lo Bianco, R. Zanasi, “Smooth profile generation for a tile printing machine”, **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, vol. 50, n. 3, pp. 471-477, June 2003, ISSN 0278-0046 (B).
- [9] C. Bonivento, L. Marconi, R. Zanasi, “Output Regulation of Nonlinear Systems by Sliding Mode”, **Automatica**, vol. 37/4, pp. 535-542, 2001, (B).
- [10] R. Zanasi, C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, “Nonlinear Filter for the Generation of Smooth Trajectories”, **Automatica**, vol.36, pp. 439-448, 2000, (B).
- [11] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, “Discrete Variable Structure Integral Controllers”, **Automatica**, vol. 34, no.3, pp. 355-361, 1998. Presentato anche al 13th World Congress - IFAC’96, vol. H, pp. 333-338, San Francisco, California, USA, Giugno 1996, ISBN 0-08-0426050, (B).
- [12] C. Bonivento, A. Nersisyan, A. Tonielli, R. Zanasi, “A Cascade Structure For Robust Control Design”, **IEEE Trans. on Automatic Control**, vol. 39, no. 4, pp. 846-849, Aprile 1994, (B).

- [13] A. Nersisyan, R. Zanasi, “A Modified Variable Structure Control Algorithm for Stabilization of Uncertain Dynamical Systems”, **Int. J. of Robust and Nonlinear Control**, M. Grimble, Ed.-in-Chief, vol. 3, Ottobre 1993, pp. 199-209, (B).
- [14] R. Zanasi, “Sliding Mode Using Discontinuous Control Algorithms of Integral Type”, **Int. Journal of Control**, Special Issue on Sliding Mode Control, V. I. Utkin, Guest Ed., vol. 57, no. 5, pp. 1079-1099, 1993, (B).

8.3 C: 3 capitoli di libri internazionali

- [15] R. Gorez, R. Zanasi, G. Antonelli, Y.L. Hsu, “Sliding Mode Control of Robot Manipulators”, in **Advances in Robotics - The ERNET perspective**, Bonivento C., Melchiorri C., Tolle H. (eds.), World Scientific Publishing, pp. 87-96, Settembre 1996, (C).
- [16] C. Bonivento, R. Zanasi, “Advances in Variable Structure Control”, in **Colloquium on Automatic Control**, (C. Bonivento, G. Marro and R. Zanasi Eds), pp. 178-226, Springer, Maggio 1996, (C).
- [17] C. Bonivento, C. Melchiorri, R. Zanasi, “Robust Binary Control of Robotic Systems”, invited paper in “**Systems, Models and Feedback: Theory and Applications**”, (A. Isidori and T.J. Tarn Eds), Birkhauser, Boston, pp. 1-15, 1992, (C).

8.4 D: 43 comunicazioni a congressi, simposi, workshops internazionali

- [18] R. Morselli, M. Borsari, R. Zanasi, A. Visconti , “Artificial Sensitivity for Power Steering: the Proactive Safety Steering Control”, **accepted** for the IFAC Symposium on Advances in Automotive Control - **AAC’04**, Salerno, Italia, April 19-23, 2004, (D).
- [19] R. Morselli, R. Zanasi, E. Sereni, E. Bedogni, E. Sedoni, “Modeling and Control of Wet Clutches by Pressure-control Valves”, **accepted** for the IFAC Symposium on Advances in Automotive Control - **AAC’04**, Salerno, Italia, April 19-23, 2004, (D).
- [20] R. Morselli, R. Zanasi, R. Cirrone, E. Sereni, E. Bedogni, E. Sedoni, “Dynamic Modeling and Control of Electro-Hydraulic Wet-Clutches”, IEEE 6th International **Conference On Intelligent Transportation Systems**, Shanghai, China, October 12-15, 2003, ISBN 0-7803-8126-2, (D).
- [21] R. Zanasi, G. Sandoni, R. Morselli, A. Visconti, F. Baldet, F. Farachi, “Dynamic Models and Control of an AMT Actuator System”, International Congress on Mechatronics - **MECH2K3**, Graz, Austria, 14-17 luglio, 2003, (D).

- [22] A. Bertacchini, R. Morselli, R. Zanasi, P. Pavan, A. Bertoli, “Control Structures and Physical Requirements for Steer-by-Wire Systems”, International Congress on Mechatronics - **MECH2K3**, Graz, Austria, 14-17 luglio, 2003, (D).
- [23] R. Morselli, A. Bertacchini, P. Ferrari, P. Pavan, R. Zanasi, “Energetic Approach for Steer-by-Wire in Off-Highway Vehicles”, International Conference in Control and Diagnostics in Automotive Applications - **CD AUTO’03**, Sestri Levante (GE), Italia, 18-20 June, 2003, (D).
- [24] R. Zanasi, G. Sandoni, R. Morselli, “Mechanical and Active Car Differentials: Detailed and Reduced Dynamic Models”, Symposium on Mathematical Modelling - **MATHMOD 2003**, Vienna, Austria, 5-7 February 2003, pp. 1011-1020, ISBN 3-901608-24-9, (D).
- [25] R. Zanasi, R. Morselli, A. Visconti, “Generation of Acceleration Profiles for Smooth Gear Shift Operations”, 28-th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - **IECON’02**, Sevilla, Spain, 5-8 November, 2002, ISBN: 0-7803-7474-4, (D).
- [26] R. Zanasi, R. Morselli, A. Visconti, M. Cavanna, “Head-neck model for the evaluation of passenger’s comfort”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - **IROS’02**, Lausanne, Switzerland, pp.1403-1408, September 30 - October 4, 2002, ISBN: 0-7803-7398-7, (D).
- [27] R. Morselli, R. Zanasi, “Positioning Trajectory Generator with Nonlinear Constraints”, IEEE **CCA/CACSD 2002** Conference, Glasgow, Scozia, pp.1177-1182, 18-20 September 2002, ISBN: 0-7803-7387-1, (D).
- [28] R. Zanasi, R. Morselli, “Third Order Trajectory Generator Satisfying Velocity, Acceleration and Jerk Constraints”, IEEE **CCA/CACSD 2002** Conference, Glasgow, Scozia, pp. 1165-1170, 18-20 September 2002, ISBN: 0-7803-7387-1, (D).
- [29] R. Zanasi, G. Sandoni, “Electronic Control of a Multi-Phase Lighting System”, 15th IFAC World Congress - **IFAC’02**, Barcelona, Spain, July 21-26, 2002, (D).
- [30] R. Zanasi, G. Sandoni, “Modeling and Electronic Control of a Lighting System”, IEEE **ISIE’2002**, L’Aquila, Italy, July 8-11 2002, (D).
- [31] R. Zanasi, G. Sandoni, A. Visconti “Dynamic Model and Control of a Gearbox System”, **Mechatronics 2002**, Twente, Enschede, Netherlands, June 24-26 2002, (D).
- [32] R. Zanasi, R. Morselli, G. Sandoni, “Simulation of Variable Dynamic Dimension Systems: the Clutch Example”, European Control Conference - **ECC’01**, Porto, Portugal, pp. 3149-3154, 4-7 September 2001, ISBN: 972-752-047-2, (D).
- [33] R. Zanasi, R. Morselli, “Second Order Smooth Trajectory Generator with Nonlinear Constraints”, European Control Conference - **ECC’01**, Porto, Portugal, pp. 1518-1523, 4-7 September 2001, ISBN: 972-752-047-2, (D).

- [34] R. Zanasi, A. Visconti, G. Sandoni, R. Morselli, “Dynamic Modeling and Control of a Car Transmission System”, 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics - **AIM '01**, Como, vol. 1, pp. 416-421, 9-11 July 2001, ISBN: 0-7803-6737-5, (D).
- [35] C. Bonivento, L. Marconi, R. Zanasi, “On the Output Regulation of Nonlinear Systems by Sliding Mode”, 14th IFAC World Congress - **IFAC'99**, Beijing, China, 5-9 July 1999, ISBN 0-08-043248-4, (D).
- [36] G. Marro, R. Zanasi, “New Formulae and Graphics for Compensator Design”, IEEE International Conference on Control Applications - **CCA'98**, Trieste, 1-4 September 1998, ISBN 0-7803-4107-4, (D).
- [37] R. Zanasi, C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, “Nonlinear Filter For Smooth Trajectory Generation” - **NOLCOS'98**, University of Twente, Enschede, the Netherlands, July 1-3 1998, (D).
- [38] R. Zanasi, C. Melchiorri, L. Marconi, “Sliding Mode Output Regulation of Nonlinear Nonminimum Phase Systems with Relative Degree One”, 6th IEEE **Mediterranean Conference on Control and Automation**, Alghero, Italy, 8-11 June 1998, (D).
- [39] R. Zanasi, “Sliding Mode Output Regulation of Linear and Nonlinear Systems”, **COSY Workshop** on “Control of Nonlinear and Uncertain Systems”, London, 6-8 February 1998, (D).
- [40] R. Gorez, R. Zanasi, G. Antonelli, “Sliding Mode Approach to Robust Suboptimal Control of Robots”, **IMACS World Congress**, Berlin, August 1997, (D).
- [41] C. Bonivento, R. Zanasi, “Review of Results of Variable Structure Control for Applications to Mechanical Systems”, Workshop on “**Modelling and Control of Mechanical Systems**”, pp. 47-63, London, 17-20 June, 1997, (D).
- [42] R. Gorez, R. Zanasi, G. Antonelli, C. Ganseman, J. De Schutter, “Introduction of a Reset Action in Sliding Mode Control of Robots”, European Control Conference - **ECC'97**, Brussels, 1-4 July, 1997, (D).
- [43] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, “Discrete Time Sliding Mode Controllers with Disturbance Estimation”, European Control Conference - **ECC'97**, Brussels, 1-4 July, 1997, (D).
- [44] R. Zanasi, “Robots' Dynamics by Using Power-Oriented Graphs ”, International Symposium on Industrial Robots, **IRIS'96**, pp. 593-598, Milano, 6-8 Ottobre 1996, (D).
- [45] C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, R. Zanasi , “Nonlinear Trajectory Generator”, 22nd Annual International Conference on the IEEE Industrial Electronics Society - **IECON'96**, The Lai Lai Sheraton Hotel, Taipei, Taiwan, Agosto 1996, (D).

- [46] R. Zanasi, "Power-Oriented Graphs for Modeling Electrical Machines", 8th Mediterranean Electrotechnical Conference - **MELECON'96**, "Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications", pp. 1211-1214, Bari, 13-16 Maggio 1996, (D).
- [47] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, "Discrete Low-Chattering Variable Structure Controllers", European Control Conference - **ECC'95**, pp. 1455-1460, Roma, 5-8 Settembre 1995, (D).
- [48] R. Zanasi, "Dynamics of a n -links Manipulator by Using Power-Oriented Graphs", Symposium on Robot Control - **SYROCO'94**, pp. 535-542, Capri, 19-21 Settembre 1994, (D).
- [49] R. Zanasi, C. Bonivento, "Discontinuous Integral Control Applied to the Orientation of a Spacecraft", **IFAC Symposium on Robust Control Design**, pp. 91-97, Rio de Janeiro, Brasil, 14-16 Settembre 1994, (D).
- [50] R. Zanasi, C. Bonivento, "Discontinuous Integral Control", IEEE Workshop on **Robust Control via Variable Structure and Lyapunov Techniques**, pp. 86-92, Benevento, 7-9 Settembre 1994, (D).
- [51] R. Zanasi, "Power-Oriented Graphs for Modelling Robotic Systems", invited paper for the IMACS/IFAC Second Int. Symposium - **MIM-S² '93**, Special Session on "Intelligent Models in Robotics", Brussels, Belgium, 12-16 Aprile 1993, (D).
- [52] C. Bonivento, C. Melchiorri, G. Vassura, R. Zanasi, "System Concepts and Control Techniques for the UBH Project", Second Int. Symp. on Measurement and Control in Robotics - **ISMCR'92**, pp. 321-328, Tsukuba Science City, Japan, 15-19 Novembre 1992, (D).
- [53] C. Bonivento, A. Nersisyan, A. Tonielli, R. Zanasi, "Robust Control Design Combining Binary and Variable Structure Techniques", Nonlinear Control System Design Symposium - **NOLCOS'92**, pp.330-335, Bordeaux, 24-26 Giugno 1992, (D).
- [54] R. Zanasi, "Discontinuous Control with Integral Action", invited poster paper in the Washington University-NSF **Workshop on Nonlinear Control**, St. Louis, 27-31 Maggio 1992, (D).
- [55] R. Zanasi, C. Bonivento, "A Review of Some Recent Results on Robust Discontinuous Control", Int. Conf. on Modelling, Identification and Control - **IASTED'92**, Innsbruck, Austria, Febbraio 1992, (D).
- [56] C. Rossi, A. Tonielli, R. Zanasi, "Variable Structure Control for AC Motor Drive", International Conference on the IEEE Industrial Electronics Society - **IECON'91**, pp. 760-765, Kobe, Japan, Novembre 1991, (D).
- [57] C. Rossi, A. Tonielli, R. Zanasi, "Variable Structure Control of a Brushless Motor", European Conference on Power Electronics and Applications - **EPE'91**, Florence, vol. 1, pp.7-12, Settembre 1991, (D).

- [58] C. Bonivento, A. Tonielli, R. Zanasi, “The MICOSS Package for Digital Control Systems Simulation”, IFAC Conf. on Advances in Control Education - **ACE’91**, Boston, 24-25 Giugno 1991, (D).
- [59] R. Zanasi, “Power-Oriented Modeling of Dynamical Systems for Simulation”, IMACS Symp. on Modeling and Control of Technological Systems - **MCTS’91**, vol. 2, pp. 31-35, Lille, France, 7-10 May 1991, (D).
- [60] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, “Binary Versus Sliding Mode Control: Simulation Experiments for Robotic Applications”, Mathematical and Intelligent Models in System Simulation - **IMACS’91**, pp. 655-661, J.C. Baltzer Pbl., Brussels, 1991, (D).

8.5 E: 5 articoli su riviste a diffusione nazionale

- [61] R. Zanasi, L. Diacci, “Celle di Carico ad Estensimetri Elettrici: i Vantaggi di una Soluzione Digitale”, **Automazine e Strumentazione**, anno LI, n. 9, pp. 59-63, Ottobre 2003, (E).
- [62] C. Bonivento, C. Rossi, A. Tonielli, R. Zanasi, “Azionamenti Elettrici: Alternative di Controllo”, “**Automazione e Strumentazione**”, pp. 159-169, Ottobre 1996, (E).
- [63] C. Bonivento, C. Rossi, A. Tonielli, R. Zanasi, “Azionamenti Elettrici: Controllo a Struttura Variabile.”, “**Automazione e Strumentazione**”, pp. 123-129, Settembre 1996, (E).
- [64] C. Bonivento, C. Melchiorri, R. Zanasi, “Configurazioni e Dispositivi di Ingegnerizzazione dei Regolatori PID Digitali”, “**Automazione e Strumentazione**”, pp. 103-110, Gennaio 1996, (E).
- [65] C. Bonivento, A. Tonielli, R. Zanasi, “MICOSS: un Ambiente per la Simulazione Avanzata di Sistemi di Controllo”, **Automazione e Strumentazione**, No. 6, pp. 103-114, Giugno 1991, (E).

8.6 F: 1 comunicazione a congressi, simposi, workshops nazionali

- [66] C. Bonivento, A. Tonielli, R. Zanasi, “Simulazione di Sistemi Dinamici con il Package MICOSS”, Strumenti Informatici nella Didattica dell’Ingegneria, Centro di Calcolo della Facoltà di Ingegneria, Bologna, Ottobre 1990, (F).

8.7 G: 9 rapporti interni

- [67] R. Zanasi, “Esercizi e Test di Controlli Automatici”, Technical Report n. DEIS-LAR-11-96, Università di Bologna, Maggio 1996, (G).
- [68] R. Zanasi, “Power-Oriented Graphs: Basic Properties”, Technical Report n. DEIS-LAR-17-96, Università di Bologna, Maggio 1996, (G).
- [69] C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, R. Zanasi , “Discrete Time Implementation of a Nonlinear Trajectory Generator”, Technical Report n. DEIS-LAR-03-96, Università di Bologna, Aprile 1996, (G).
- [70] R. Zanasi, R. Gorez, Y.L. Hsu, “Sliding Mode Control with Integral Action”, Technical Report Nr.95.84, Université Catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgium, Ottobre 1995, (G).
- [71] R. Zanasi, “Power-Oriented Graphs for Modeling Electric Motors”, Technical Report n. DEIS-LAR-10-96, Università di Bologna, Giugno 1993, (G).
- [72] R. Zanasi, “Modeling Time-Varying Dynamic Systems by Using Power-Oriented Graphs”, Technical Report n. DEIS-LAR-09-96, Università di Bologna, Gennaio 1993, (G).
- [73] R. Zanasi, “A Mathematica Environment for Modeling Robot Dynamics”, Technical Report n. DEIS-LAR-08-96, Università di Bologna, Ottobre 1992, (G).
- [74] R. Zanasi, K. Salisbury, “Dynamic Modeling, Simulation and Parameter Identification for the WAM Arm”, A.I. Memo No. 1387, MIT, Cambridge, USA, Agosto 1992, (G).
- [75] A. Nersisian, R. Zanasi, “Binary Control Approach for Robust Stabilization and Tracking of Uncertain Dynamical Systems”, Report No. GRA-91-02, Università di Bologna, Gennaio 1991, (G).

9 Sommari ragionati delle pubblicazioni

In questa sezione le pubblicazioni sono state suddivise per tematica. I riferimenti bibliografici che compaiono in questa sezione fanno riferimento alla numerazione delle pubblicazioni riportate nella Sezione 8. Per ogni tematica presentata, vengono fornite le principali informazioni riguardante l'attività di ricerca svolta in quell'ambito e in particolare vengono precisati i contenuti degli articoli ritenuti più significativi.

9.1 Simulazione di sistemi dinamici

In questo ambito, il candidato ha sviluppato e messo a punto un programma, denominato MICOSS, sviluppato presso il DEIS, Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna, in collaborazione con il Prof. Bonivento e il Prof. Tonielli.

- [6] C. Bonivento, A. Tonielli, R. Zanasi, “ Simulazione di Sistemi Dinamici con Programma MICOSS”, Pitagora Editrice Bologna, Gennaio 1990, (A).

La pubblicazione [6] è il manuale d'uso del programma MICOSS. Tale programma permette la simulazione di sistemi lineari, non lineari, a tempo-continuo e tempo-discreto. La descrizione del sistema da simulare è del tipo “schema a blocchi funzionali”. Il programma permette di specificare non solo i parametri del sistema fisico da controllare, ma anche quelli dei vincoli realizzativi e delle condizioni operative del dispositivo di controllo, quali per esempio l'aritmetica di elaborazione, il periodo di campionamento delle variabili, la commutazione dei segnali di attuazione.

Il programma, oltre a mettere a disposizione i moduli algebrici e dinamici di uso più comune (sommatore, integratore, generatori di gradino, rampa, ecc.), permette anche l'utilizzo di alcuni blocchi speciali (modulatori PWM) particolarmente utili per la simulazione di una classe di dispositivi di largo interesse pratico caratterizzati da segnali di tipo discontinuo. MICOSS è un programma aperto che permette all'utente di creare nuovi blocchi e di inserirli facilmente nel sistema mediante una semplice operazione di Link. All'interno del programma è inoltre presente anche un “blocco algebrico generalizzato” che espande notevolmente le potenzialità simulative del programma stesso.

- [66] C. Bonivento, A. Tonielli, R. Zanasi, “Simulazione di Sistemi Dinamici con il Package MICOSS”, Strumenti Informatici nella Didattica dell'Ingegneria, Centro di Calcolo della Facoltà di Ingegneria, Bologna, Ottobre 1990, (F).
- [65] C. Bonivento, A. Tonielli, R. Zanasi, “MICOSS: un Ambiente per la Simulazione Avanzata di Sistemi di Controllo”, Automazione e Strumentazione, No. 6, pp. 103-114, Giugno 1991, (E).

In [66] sono riportate, in forma divulgativa, le principali caratteristiche tecnico-simulative del programma. Nell' articolo [65] vengono descritte le potenzialità del programma soprattutto per quanto riguarda la simulazione di sistemi governati da segnali PWM. In particolare viene descritta una esperienza simulativa del controllo di coppia di un motore sincrono a magneti permanenti.

- [58] C. Bonivento, A. Tonielli, R. Zanasi, “The MICOSS Package for Digital Control Systems Simulation”, IFAC Conf. on Advances in Control Education - ACE’91, Boston, 24-25 Giugno 1991, (D).

In [58], MICOSS è stato posto a confronto con due altri programmi di simulazione molto diffusi: SPICE e SIMNON. Ognuno di questi tre programmi possiede caratteristiche simulative che lo rendono “peculiare” per una ben determinata categoria di sistemi fisici da simulare.

Lo sviluppo di programmi simulativi del tipo Matlab/Simulink ha ormai reso obsolete le funzionalità grafiche del programma MICOSS, ma il lavoro svolto dal candidato nello sviluppo di questo programma gli ha permesso di maturare competenze specifiche nel settore della modellistica e della simulazione dei sistemi dinamici che ha portato successivamente allo sviluppo della tecnica modellistica denominata “Power-Oriented Graphs”.

9.2 Controllo Robusto - Sliding Mode con Azione Integrale

Lo studio comparato della teoria del Controllo Binario e della più diffusa teoria del Controllo Sliding Mode ha portato il candidato a sviluppare un nuovo regolatore non lineare che combina fra loro queste due tecniche di Controllo. L’algoritmo proposto è del tipo a Struttura Variabile (Sliding Mode) con l’aggiunta originale di un’azione integrale non lineare che si dimostra essere efficace nello stimare i disturbi agenti sul sistema. L’azione della parte integrale, unitamente alla presenza del termine switching di ampiezza piccola a piacere, permette di ottenere un comportamento globale molto “robusto” sia rispetto all’azione dei disturbi esterni che alle variazioni di parametri interni. Questa nuova tecnica di controllo, denominata Controllo Discontinuo con Azione Integrale, inizialmente è stata studiata e sviluppata per sistemi tempo-continui [13], [60], [17], [14],[12], [53], [15], [49], [50], e poi successivamente è stata estesa anche al caso di sistemi tempo-discreti [47], [16], [11], [43], [41]. In particolare, nel caso tempo-discreto sono state proposte nuove strutture di controllo robusto, sia di natura statica che adattativa, che sono in grado di assicurare una forte reiezione dei disturbi esterni garantendo contemporaneamente anche una buona riduzione del chattering presente all’interno del sistema [16], [11]. La tecnica sliding mode con azione integrale è stata anche utilizzata per progettare un regolatore non lineare con retroazione dall’uscita in grado di assicurare ad un sistema non lineare l’inseguimento asintotico di una traiettoria di riferimento [9], [35], [38], [39].

Di seguito, per ogni singolo articolo o gruppi di articoli pubblicati in questo ambito, vengono richiamati brevemente gli elementi salienti.

- [13] A. Nersisian, R. Zanasi, “A Modified Variable Structure Control Algorithm for Stabilization of Uncertain Dynamical Systems”, Int. J. of Robust and Nonlinear Control, M. Grimble, Ed.-in-Chief, vol. 3, Ottobre 1993, pp. 199-209, (B).
- [75] A. Nersisian, R. Zanasi, “Binary Control Approach for Robust Stabilization and Tracking of Uncertain Dynamical Systems”, Report No. GRA-91-02, Università di Bologna, Gennaio 1991, (G).

Negli articoli [13] e [75] sono riportati i risultati “originali” ottenuti nell’ambito di una collaborazione internazionale tra il DEIS di Bologna (Prof. C. Bonivento) e L’IRIMS di Mosca (Acad. S. Emelyanov). In questi due articoli viene proposto un “nuovo” controllore a struttura variabile che presenta interessanti proprietà di robustezza nella stabilizzazione di sistemi dinamici tempo-varianti in presenza sia di disturbi parametrici che di disturbi esterni. La caratteristica essenziale dell’algoritmo proposto è la presenza di un termine “integrale” (non lineare) che ha la funzione di “stimare” il disturbo agente sul sistema. L’azione “congiunta” del termine integrale e di un “piccolo termine discontinuo” permette al sistema controllato di rimanere in sliding mode anche se il disturbo esterno è molto più ampio della componente discontinua presente nel controllo. Un evidente vantaggio connesso alla riduzione della componente discontinua è la drastica riduzione del chattering del sistema. La struttura di controllo proposta viene inoltre inserita nell’ambito della più generale teoria del Controllo Binario.

- [57] C. Rossi, A. Tonielli, R. Zanasi, “Variable Structure Control of a Brushless Motor”, EPE, Florence, vol. 1, pp.7-12, Settembre 1991, (D).

In [57] la tecnica di controllo VSS (Sistemi a Struttura Variabile) viene utilizzata per il controllo, in ambito robotico, di un motore brushless. Viene utilizzata una struttura di controllo in cascata formata da un anello interno di corrente e un anello esterno di velocità. Per ottenere la massima “robustezza” anche a fronte di forti variazioni dei parametri elettrici e meccanici, nei due anelli di controllo sono state utilizzate due diverse tecniche di controllo. Per l’anello interno di corrente è stato utilizzato un controllore di tipo “sliding mode”, mentre per l’anello esterno di velocità si è invece utilizzato un controllore di tipo “binario”. Tale scelta è stata dettata dal fatto che il controllore di velocità esterno deve necessariamente fornire un segnale “continuo” all’anello interno di corrente e dal fatto che il controllore binario soddisfa “strutturalmente” questa specifica.

- [56] C. Rossi, A. Tonielli, R. Zanasi, “Variable Structure Control for AC Motor Drive”, IECON '91, pp. 760-765, Kobe, Japan, Novembre 1991, (D).

In [56] viene preso in considerazione il problema del controllo robusto di un motore asincrono in corrente alternata. Anche in questo caso è stata utilizzata una struttura di controllo in cascata. L’anello interno di corrente è stato realizzato mediante un controllore ad “orientamento di campo” del tipo “sliding mode multivariabile con isteresi”. Per l’anello esterno di velocità si è utilizzato un controllore “binario modificato” come proposto in [75]. La presenza del nuovo termine integrale migliora sensibilmente le capacità del sistema di inseguire profili di velocità esterni. La struttura di controllo proposta è stata utilizzata in simulazione per il controllo della velocità di un braccio robotico soggetto a forti variazioni sia della coppia di carico che del momento di inerzia. I risultati simulativi ottenuti sono molto incoraggianti.

- [60] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, “Binary Versus Sliding Mode Control: Simulation Experiments for Robotic Applications”, Mathematical and Intelligent Models in System Simulation - IMACS'91, pp. 655-661, J.C. Baltzer Pbl., Brussels, 1991, (D).

In [60] vengono riportati alcuni risultati simulativi riguardanti la teoria del “Controllo Binario” applicata al sistema robotico U.B.H. (University of Bologna Hand). Da un punto di vista teorico, questa tecnica sembra possedere interessanti caratteristiche di controllo: generalizza l’approccio Sliding Mode ed evita “fenomeni limite” quali la discontinuità dei segnali di controllo e il chattering. Per la sintesi del controllore binario si è utilizzato un programma di CAD, denominato BCD, sviluppato appositamente. Le simulazioni sono state eseguite con il programma MICOSS. Il confronto tra le caratteristiche teoriche attese e i risultati simulativi ottenuti hanno evidenziato alcuni “limiti” della teoria del Controllo Binario.

- [17] C. Bonivento, C. Melchiorri, R. Zanasi, “Robust Binary Control of Robotic Systems”, invited paper in “Systems, Models and Feedback: Theory and Applications”, (A. Isidori and T.J. Tarn Eds), Birkhauser, Boston, pp. 1-15, 1992, (C).

In [17] vengono riportati dei risultati sperimentali ottenuti applicando la tecnica di “controllo discontinuo con azione integrale” al giunto Master del sistema robotico WAM (Whole-Arm Manipulator) sviluppato al MIT dal Dr. Ken Salisbury. Tali risultati sperimentali, ottenuti durante un periodo di studio trascorso all’Artificial Intelligence Laboratory (MIT) di Boston, sono risultati incoraggianti, soprattutto se confrontati con quelli forniti da un normale regolatore PID. La parte teorica dell’articolo evidenzia come il “controllore discontinuo” possa inserirsi “in modo naturale” nello schema generale della teoria del Controllo Binario come una opportuna modifica dell’anello di controllo OCF (Operator-Coordinate Feedback).

- [14] R. Zanasi, “Sliding Mode Using Discontinuous Control Algorithms of Integral Type”, Int. Journal of Control, Special Issue on Sliding Mode Control, V. I. Utkin, Guest Ed., vol. 57, no. 5, pp. 1079-1099, 1993, (B).

- [5] R. Zanasi, “Controllo Discontinuo di Sistemi Dinamici con Applicazioni alla Robotica”, Tesi di Dottorato, DEIS, Università di Bologna, Febbraio 1992, (A).

In [14] sono stati pubblicati i risultati più significativi dell’attività scientifica che è svolta durante il dottorato di ricerca e che è riportata in forma estesa nella tesi [5]. L’algoritmo di controllo proposto per la prima volta in [75] e [13], viene qui analizzato nell’ambito della teoria dei Sistemi a Struttura Variabile. Il regolatore proposto, denominato “controllo discontinuo con azione integrale”, ha una struttura particolarmente semplice, simile a quella di un regolatore PID: i parametri di progetto sono l’ampiezza k della componente discontinua, il coefficiente λ della parte proporzionale e il coefficiente h della parte integrale non-lineare. Da una dettagliata analisi della stabilità del sistema controllato si è giunti a determinare, per i parametri del regolatore, “semplici condizioni sufficienti” che garantiscono la globale stabilità del sistema controllato. Si è inoltre studiato il problema di mantenere il sistema in sliding mode anche in presenza di disturbi esterni di tipo “discontinuo”. In questo caso oltre all’azione del termine integrale deve essere presente anche un termine discontinuo di ampiezza non trascurabile. Risultati simulativi e sperimentali relativi all’applicazione di queste tecniche di controllo a sistemi elettromeccanici e robotici corredano la parte teorica dei due lavori.

- [12] C. Bonivento, A. Nersisyan, A. Tonielli, R. Zanasi, “A Cascade Structure For Robust Control Design”, IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 39, no. 4, pp. 846-849, Aprile 1994, (B).
- [53] C. Bonivento, A. Nersisyan, A. Tonielli, R. Zanasi, “Robust Control Design Combining Binary and Variable Structure Techniques”, Nonlinear Control System Design Symposium - NOLCOS '92, pp.330-335, Bordeaux, 24-26 Giugno 1992, (D).

Negli articoli [12] e [53] le tecniche di controllo Binario e a Struttura Variabile vengono combinate insieme per ottenere una struttura di controllo “in cascata” particolarmente adatta per il controllo di sistemi elettromeccanici. Il controllore interno “di corrente” è di tipo Sliding Mode, e fornisce un segnale di controllo discontinuo che permette sia la reiezione completa dei disturbi sulla parte elettrica che una “riduzione” dell’ordine del sistema da controllare. Trattandosi di “tensioni”, le discontinuità del segnale di controllo fornite dal regolatore interno non danneggiano il sistema controllato. L’anello esterno “di velocità” è di tipo Binario, modificato con l’aggiunta di un termine integrale per stimare i disturbi esterni. Il segnale di controllo generato dall’anello di velocità, e fornito come segnale di riferimento all’anello interno di corrente, è di tipo “continuo”, e quindi è adatto per fungere da segnale di riferimento per l’anello interno. La parte teorica degli articoli è corredata da risultati simulativi riguardanti il controllo di un motore elettrico in corrente continua a magneti permanenti, soggetto a forti disturbi esterni.

- [54] R. Zanasi, “Discontinuous Control with Integral Action”, invited poster paper in the “Washington University-NSF Workshop on Nonlinear Control”, St. Louis, 27-31 Maggio 1992, (D).

Lo scopo principale del poster [54] è stato quello di rendere nota la tecnica di “controllo discontinuo con azione integrale” ad un’ampia e qualificata platea di studiosi di problemi non-lineari.

- [55] R. Zanasi, C. Bonivento, “A Review of Some Recent Results on Robust Discontinuous Control”, Proc. 11’ IASTED Int. Conf. on Modelling, Identification and Control, Innsbruck, Austria, Febbraio 1992, (D).
- [52] C. Bonivento, C. Melchiorri, G. Vassura, R. Zanasi, “System Concepts and Control Techniques for the UBH Project”, Second Int. Symp. on Measurement and Control in Robotics - ISMCR’92, pp. 321-328, Tsukuba Science City, Japan, 15-19 Novembre 1992, (D).

Anche gli articoli [55] e [52] hanno avuto, principalmente, un carattere divulgativo. Il primo mette a confronto il Controllo Binario, i Sistemi a Struttura Variabile e il Controllo Discontinuo con Azione Integrale discutendone alcuni vantaggi e svantaggi in relazione alle esperienze applicative avute. In [52] vengono invece discusse le principali caratteristiche meccaniche, sensoriali e “di controllo” della mano robotica UBH (University of Bologna Hand) versione II, sviluppata presso DEIS dell’Università di Bologna. Nell’articolo si evidenzia come la tecnica “robusta” del Controllo Discontinuo possa risultare di notevole utilità nel controllo dei sistemi robotici, quali la UBH, notoriamente soggetti a “forti” disturbi sia parametrici che esterni.

- [49] R. Zanasi, C. Bonivento, “Discontinuous Integral Control Applied to the Orientation of a Spacecraft”, “IFAC Symposium on Robust Control Design”, pp. 91-97, Rio de Janeiro, Brasil, 14-16 Settembre 1994, (D).

In [49], la tecnica del Controllo Discontinuo con azione Integrale è stata utilizzata per controllare l’orientamento nel vuoto di una navicella spaziale. In questo articolo vengono anche forniti alcuni risultati teorici riguardanti la stabilità del sistema controllato quando il termine discontinuo di controllo viene sostituito da un termine del tipo “saturazione”. Il modello dinamico della navicella spaziale viene ricavato utilizzando la tecnica modellistica POG. Questo articolo si conclude con la presentazione di alcuni risultati simulativi.

- [50] R. Zanasi, C. Bonivento, “Discontinuous Integral Control”, IEEE Workshop on “Robust Control via Variable Structure and Lyapunov Techniques”, pp. 86-92, Benevento, 7-9 Settembre 1994, (D).

In [50], la tecnica “Discontinuous Integral Control” (DIC) viene utilizzata per controllare la concentrazione di un prodotto di reazione all’interno di un reattore chimico. I risultati simulativi ottenuti sono confrontati con quelli ottenuti da altri autori sullo stesso sistema. Questo articolo presenta anche alcuni risultati teorici riguardanti la stabilità del sistema retroazionato nei casi di controllo discontinuo e di controllo saturato.

- [70] R. Zanasi, R. Gorez, Y.L. Hsu, “Sliding Mode Control with Integral Action”, Technical Report Nr.95.84, Université Catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgium, Ottobre 1995, (G).

Il technical report [70] documenta parte dell’attività di ricerca svolta dal candidato durante la sua permanenza di un mese presso l’Université Catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgium, sotto la direzione del Prof. Raymond Gorez. L’attività svolta ha riguardato l’uso di controllori nonlineari di tipo Sliding Mode per il controllo di posizione point-to-point di sistemi robotici.

- [47] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, “Discrete Low-Chattering Variable Structure Controllers”, “European Control Conference - ECC’95”, pp. 1455-1460, Roma, 5-8 Settembre 1995, (D).

In [47], per la prima volta, viene considerato il caso tempo-discreto del controllore discontinuo con azione. La struttura proposta viene arricchita con un termine aggiuntivo che prende in considerazione anche la derivata del segnale controllato allo scopo di mantenere limitato il più possibile il fenomeno del chattering che spesso si manifesta quando si utilizzano controllori robusti di natura discreta. Nell’articolo si dimostra la robustezza dell’algoritmo proposto nei confronti di disturbi esterni del tipo a gradino, a rampa e a sinusoidale.

- [2] C. Bonivento, G. Marro, R. Zanasi (Eds), Colloquium on Automatic Control, Springer, Maggio 1996, ISBN 3540760601, (A).

- [16] C. Bonivento, R. Zanasi, “Advances in Variable Structure Control”, in Colloquium on Automatic Control, (C. Bonivento, G. Marro and R. Zanasi Eds), pp. 178-226, Springer, Maggio 1996, (C).

In [2], [16] viene presentata una serie di risultati ottenuti nel campo del controllo robusto dei sistemi fisici. In particolare, l’articolo si sofferma sulla metodologia del Controllo Discontinuo con Azione Integrale nelle due versioni tempo-continua e tempo-discreta. Nell’articolo sono presenti numerosi esempi applicativi di questa tecnica. Alcuni di questi sono simulativi, mentre altri descrivono applicazioni pratiche fisicamente realizzate, come ad esempio il controllo di velocità di un motore elettrico soggetto ad un forte disturbo di coppia agente sul carico, oppure il controllo di posizione “point-to-point” di un giunto di un sistema robotico.

- [11] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, “Discrete Variable Structure Integral Controllers”, *Automatica*, vol. 34, no. 3, pp. 355-361, 1998. Presentato anche al 13th World Congress - IFAC’96, vol. H, pp. 333-338, San Francisco, California, USA, Giugno 1996, ISBN 0-08-0426050, (B).

In [11] vengono studiate le caratteristiche dinamiche del Controllo Discontinuo con azione Integrale (DIC) nel caso tempo-discreto. Nell’articolo viene proposta una versione discreta del controllo DIC opportunamente modificata per tener conto delle informazioni che sono disponibili sulla derivata temporale della variabile di controllo. Questo tipo di controllore discreto risulta essere molto efficace nella riduzione del chattering nel caso in cui i parametri del sistema siano noti. Nell’articolo viene proposta e analizzata anche una struttura di controllo “adattativa” che permette di stimare efficacemente le variazioni parametriche di tipo “inerziale” che si hanno all’interno del sistema. La locale e asintotica stabilità del sistema retroazionato viene dimostrata nel caso di disturbi esterni costanti. Il controllore proposto viene poi utilizzato in simulazione per controllare un motore in corrente continua collegato ad una carico inerziale tempo-variante.

- [15] R. Gorez, R. Zanasi, G. Antonelli, Y.L. Hsu, “Sliding Mode Control of Robot Manipulators”, in *Advances in Robotics - The ERNET perspective*, Bonivento C., Melchiorri C., Tolle H. (eds.), World Scientific Publishing, pp. 87-96, Settembre 1996, (C).

In [15] il controllo Sliding Mode viene applicato al controllo di posizione “point-to-point” di un manipolatore robotico. Nell’articolo viene proposto l’utilizzo di una semplice superficie di sliding, funzione non lineare degli errori di posizione, mediante la quale è possibile ottenere dei comportamenti “smooth” della variabile controllata mantenendo nel contempo limitata la velocità massima ammissibile. La comparsa di chattering nel sistema viene evitata utilizzando una funzione di tipo “saturazione” al posto della funzione “segno”. Il raggiungimento esatto delle posizione finale viene garantita dall’aggiunta di un termine integrale all’interno delle legge di controllo. La tecnica proposta viene utilizzata per controllare il primo giunto di un sistema robotico industriale (Kuka 316). I dati sperimentali confermano i risultati teorici ottenuti.

- [63] C. Bonivento, C. Rossi, A. Tonielli, R. Zanasi, “Azionamenti Elettrici: Controllo a Struttura Variabile.”, “ Automazione e Strumentazione”, pp. 123-129, Settembre 1996, (E).
- [62] C. Bonivento, C. Rossi, A. Tonielli, R. Zanasi, “Azionamenti Elettrici: Alternative di Controllo”, “ Automazione e Strumentazione”, pp. 159-169, Ottobre 1996, (E).

Gli articoli [63] e [62] documentano un lavoro teorico e sperimentale riguardante l'applicazione della tecnica Sliding Mode al controllo di azionamenti elettrici. In particolare l'articolo [63] prende in considerazione il problema del controllo di servomeccanismi di posizione e di velocità e mostra che la struttura di controllo in cascata è la più idonea per questo tipo di sistemi. In [62] si mostra come le nuove tecniche di controllo robusto di tipo “Sliding Mode” permettano di ottenere una soluzione molto semplice e molto efficace nella reiezione dei disturbi esterni e dei disturbi parametrici. Nell'articolo vengono anche riportate alcune prove sperimentali riguardanti il controllo di velocità di un manovellismo con agganciato un elemento terminale “folle”.

- [43] C. Bonivento, M. Sandri, R. Zanasi, “Discrete Time Sliding Mode Controllers with Disturbance Estimation”, European Control Conference - ECC'97, Brussels, 1-4 July, 1997, (D).

L'articolo [43] si occupa del problema della stabilizzazione dall'uscita di un sistema lineare in presenza di disturbi esterni non noti. La metodologia utilizzata è quella dei regolatori a struttura variabile con azione integrale. Vengono presi in considerazione sia il caso tempo-continuo che tempo-discreto. Il sistema lineare considerato è costituito dalla cascata di r integratori. La caratteristica principale dei controllori proposti è la presenza nel regolatore di un'azione integrale non lineare che agisce come “stimatore di tutti i disturbi esterni presenti all'ingresso del sistema. Questo stimatore fornisce un'azione di controllo feed-forward che permette di mantenere piccola l'ampiezza del termine discontinuo di controllo e quindi risulta essere efficace nella riduzione del chattering. Nell'articolo si dimostra anche la stabilità del sistema controllato in presenza di un disturbo esterno non noto con derivata limitata.

- [42] R. Gorez, R. Zanasi, G. Antonelli, C. Ganseman, J. De Schutter, “Introduction of a Reset Action in Sliding Mode Control of Robots”, European Control Conference - ECC'97, Brussels, 1-4 July, 1997, (D).

L'articolo [42] prende in considerazione quattro diversi tipi di superficie di commutazione per un sistema a struttura variabile che controlla il posizionamento point-to point di un manipolatore robotico. Le caratteristiche del sistema di controllo presentato vengono testate in un caso reale di controllo del giunto base di un manipolatore a 6 gradi di libertà.

- [41] C. Bonivento, R. Zanasi, “Review of Results of Variable Structure Control for Applications to Mechanical Systems”, Workshop on “Modelling and Control of Mechanical Systems”, pp. 47-63, London, 17-20 June, 1997, (D).

L'articolo [41] riassume i concetti e le proprietà fondamentali del Controllo a Struttura Variabile. In questo articolo vengono riportati alcuni risultati teorici riguardanti la stima dei disturbi esterni nei sistemi a struttura variabile, sia di tipo tempo-continuo che tempo-discreto, utilizzati per il controllo di sistemi meccanici. L'articolo riporta dei risultati simulativi riguardanti il controllo di posizione di un sistema elettromeccanico soggetto a forti variazioni parametriche di tipo "inerziale".

- [39] R. Zanasi, "Sliding Mode Output Regulation of Linear and Nonlinear Systems", COSY Workshop on "Control of Nonlinear and Uncertain Systems", London, 6-8 February 1998, (D).
- [38] R. Zanasi, C. Melchiorri, L. Marconi, "Sliding Mode Output Regulation of Nonlinear Nonminimum Phase Systems with Relative Degree One", 6th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Alghero, Italy, 8-11 June 1998, (D).

I due articoli [39] e [38] utilizzano la tecnica Sliding Mode per controllare l'uscita di una sistema dinamico. Vengono presi in considerazione i seguenti due casi: 1) controllo di un sistema non lineare mediante retroazione statica dello stato; 2) controllo di un sistema lineare con retroazione dinamica del solo segnale errore. Vengono presi in considerazione solo sistemi a grado relativo uno, sia a fase minima che a fase non minima. Il disturbo esterno viene descritto mediante un sistema dinamico neutralmente stabile.

- [9] C. Bonivento, L. Marconi, R. Zanasi, "Output Regulation of Nonlinear Systems by Sliding Mode", Automatica, vol. 37, no. 4, pp. 535-542, 2001, (B).
- [35] C. Bonivento, L. Marconi, R. Zanasi, "On the Output Regulation of Nonlinear Systems by Sliding Mode", 14th IFAC World Congress - IFAC'99, Beijing, China, 5-9 July 1999, ISBN 0-08-043248-4, (D).

L'articolo [9] prende in considerazione il progetto di un regolatore sliding mode con retroazione dall'uscita in grado di assicurare ad un sistema non lineare l'inseguimento asintotico di una traiettoria di riferimento. Si fa l'ipotesi che la traiettoria di riferimento venga generata da un sistema esterno neutralmente stabile il cui stato deve essere noto. La metodologia di progetto proposta nell'articolo è basata sulla teoria del "center manifold", sul concetto di "controllo equivalente". In [9] è stata pubblicata una versione espansa e riveduta dei risultati preliminari che erano stati presentati in [35].

9.3 Modellistica di sistemi fisici: Power-Oriented Graphs

Lo studio delle problematiche di modellistica e simulazione dei sistemi dinamici ha portato il candidato a sviluppare particolari schemi a blocchi, denominati Power-Oriented Graphs (POG) che permettono un più diretto controllo dei flussi di potenza presenti all'interno del sistema fisico. Le caratteristiche principali di questa tecnica modellistica sono state descritte per la prima volta in [59]. Successivamente, questa tecnica modellistica POG è stata diffusamente utilizzata dal candidato all'interno di molti dei lavori scientifici. Oltre agli articoli presenti in questa sezione, si veda anche [21], [24], [25], [26], [29], [30], [31], [32] e [34].

- [59] R. Zanasi, "Power-Oriented Modeling of Dynamical Systems for Simulation", IMACS Symp. on Modeling and Control of Technological Systems - MCTS'91, vol. 2, pp. 31-35, Lille, France, 7-10 May 1991, (D).

In [59], per la prima volta, vengono definite le proprietà fondamentali degli schemi a blocchi, denominati "Power-Oriented Graphs" (P.O.G.), orientati alla descrizione dei flussi di potenza all'interno dei sistemi fisici. Si tratta di normali "schemi a blocchi" opportunamente strutturati in modo da mantenere accoppiate le variabili di stato il cui prodotto abbia il significato fisico di "potenza fluente" in una determinata sezione del sistema fisico. Gli schemi a blocchi che si ottengono risultano particolarmente semplici e di struttura "modulare". La quasi totalità dei sistemi "fisici" può essere rappresentata graficamente utilizzando solamente due blocchi: un "blocco di elaborazione" nel quale può essere immagazzinata e/o dissipata energia, e un "blocco di connessione" che trasforma le variabili di stato da un campo energetico all'altro senza mai né accumulare né dissipare energia.

Altre caratteristiche dei "Power-Oriented Graphs" sono le seguenti: a) diretta corrispondenza tra i blocchi dello schema e gli elementi fisici; b) possibilità di inversione ingresso-uscita del sistema senza modificare la struttura del grafo; c) capacità di rappresentare sistemi fisici sia mono-dimensionali che multi-dimensionali; d) possibilità di trasformare gli schemi P.O.G. mediante l'utilizzo di semplici regole di trasformazione; e) esistenza di un legame diretto tra la rappresentazione grafica P.O.G. e la corrispondente rappresentazione matematica nello spazio degli stati. f) nel caso in cui alcuni dei parametri dinamici del sistema tendano a zero o all'infinito, è possibile ottenere il corrispondente schema P.O.G. "ridotto" semplicemente utilizzando un'opportuna trasformazione di "congruenza".

- [74] R. Zanasi, K. Salisbury, "Dynamic Modeling, Simulation and Parameter Identification for the WAM Arm", A.I. Memo No. 1387, MIT, Cambridge, USA, Agosto 1992, (G).

In [74], la tecnica "Power-Oriented Graphs" è stata applicata alla modellistica del sistema robotico WAM (Whole-Arm Manipulator) con particolare attenzione al modello elastico-inerziale del sistema di trasmissione delle coppie motrici. La tecnica di "riduzione" degli schemi P.O.G. mediante "trasformazioni di congruenza" si è rivelata particolarmente utile per ottenere diversi "gradi di approssimazione" nella modellistica del sistema di trasmissione. Il modello dinamico del sistema robotico è stato poi utilizzato per "identificare" alcuni dei parametri non noti del sistema. Nell'articolo vengono inoltre presentati i risultati simulativi dell'intero sistema robotico comparati con i corrispondenti valori sperimentali: la corrispondenza ottenuta è molto buona.

- [73] R. Zanasi, "A Mathematica Environment for Modeling Robot Dynamics", Technical Report n. DEIS-LAR-08-96, Università di Bologna, Ottobre 1992, (G).

In [73] sono stati riportati i dettagli tecnici riguardanti una serie di comandi, sviluppati per il programma di elaborazione simbolica Mathematica, che permettono di ricavare facilmente e rapidamente il modello dinamico di un qualsiasi manipolatore rigido a giunti rotazionali. Questi comandi sono stati utilizzati in [74] per ricavare il modello dinamico del sistema robotico WAM.

- [51] R. Zanasi, “Power-Oriented Graphs for Modelling Robotic Systems”, invited paper for the IMACS/IFAC Second Int. Symposium MIM-S² '93, Special Session on “Intelligent Models in Robotics”, Brussels, Belgium, 12-16 Aprile 1993, (D).

Nell'articolo [51] la tecnica “Power-Oriented Graphs” è stata applicata alla modellistica di un sistema robotico avente sistema un di trasmissione di tipo “elastico”. Utilizzando le tecniche di trasformazione tipiche degli schemi P.O.G. si è ricavato il modello dinamico “ridotto” del sistema robotico nel caso in cui “solo alcune” delle elasticità del sistema di trasmissione tendono a zero.

- [71] R. Zanasi, “Power-Oriented Graphs for Modeling Electric Motors”, Technical Report n. DEIS-LAR-10-96, Università di Bologna, Giugno 1993, (G).
- [46] R. Zanasi, “Power-Oriented Graphs for Modeling Electrical Machines”, 8th Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON'96, “Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications”, pp. 1211-1214, Bari, 13-16 Maggio 1996, (D).

In [71] vengono presentati i modelli dinamici di alcuni motori elettrici ottenuti utilizzando la tecnica “Power-Oriented Graph”. Sono stati analizzati i seguenti motori elettrici: a) motore in corrente continua; b) motore trifase sincrono (brushless); c) motore trifase asincrono. Le rappresentazioni grafiche P.O.G. che emergono dall'analisi svolta, mettono chiaramente in evidenza la “struttura interna” dei motori: la parte elettrica interagisce con la parte meccanica mediante un blocco di “trasformazione” che non dissipa e non accumula energia. Con una scelta opportuna del sistema di riferimento i modelli dinamici di tutti i motori elettrici considerati assumono una forma particolarmente semplice e chiara. Per eseguire le trasformazioni tra i vari modelli dinamici ci si è avvalsi di un formalismo “esponenziale” particolarmente compatto. Inoltre, questo lavoro mette in evidenza gli stretti legami esistenti tra i Power-Oriented Graphs e il modello dinamico “Lagrangiano” del sistema fisico in esame. Alcuni dei risultati riportati su questo rapporto interno sono stati pubblicati nell'articolo a carattere divulgativo [46].

- [72] R. Zanasi, “Modeling Time-Varying Dynamic Systems by Using Power-Oriented Graphs”, Technical Report n. DEIS-LAR-09-96, Università di Bologna, Gennaio 1993, (G).
- [68] R. Zanasi, “Power-Oriented Graphs: Basic Properties”, Technical Report n. DEIS-LAR-17-96, Università di Bologna, Maggio 1996, (G).

In [72] sono stati riportati alcuni risultati preliminari riguardanti alcune regole di trasformazione degli schemi P.O.G. nel caso di modellistica di sistemi non lineari. Queste regole di trasformazione sono state applicate, a scopo esemplificativo, ai modelli dinamici di un manipolatore, di una cisterna a sezione variabile e al moto di un corpo rigido nello spazio. Nel rapporto interno [68] sono riportate una serie di interessanti proprietà degli schemi a blocchi POG che non sono ancora state pubblicate in altra sede.

- [48] R. Zanasi, “Dynamics of a n -links Manipulator by Using Power-Oriented Graphs”, Symposium on Robot Control - SYROCO'94, pp. 535-542, Capri, 19-21 Settembre 1994, (D).
- [44] R. Zanasi, “Robots' Dynamics by Using Power-Oriented Graphs”, International Symposium on Industrial Robots, IRIS'96, pp. 593-598, Milano, 6-8 Ottobre 1996, (D).

Nell'articolo [48], la tecnica modellistica “Power-Oriented Graphs” (POG) viene utilizzata per ricavare le equazioni dinamiche non lineari di un manipolatore robotico a n gradi di libertà. Prima si determina il modello dinamico del manipolatore “elastico” che si ottiene quando nei giunti vengono inserite delle elasticità. Successivamente, si determina il modello dinamico del manipolatore “rigido” facendo tendere a zero le elasticità inserite nei giunti. Utilizzando le particolari proprietà strutturali della tecnica modellistica “Power-Oriented Graphs” si dimostra che la riduzione al caso “rigido” può essere ottenuta facilmente utilizzando una trasformazione di congruenza nello spazio degli stati. Tale trasformazione è di tipo rettangolare e permette di trasformare e ridurre il sistema contemporaneamente. Il modello dinamico “rigido” che si ottiene in questo modo ha una struttura interna molto simile a quella che si ottiene utilizzando l'approccio a “operatori spaziali”. In [44] sono riportate, in forma ridotta, alcune delle principali caratteristiche dei sistemi dinamici descritti in [48].

9.4 Generazione di traiettorie ottime

Nella movimentazione e nel controllo dei sistemi elettromeccanici, svolge una funzione importante la determinazione delle azioni di controllo in avanti e la scelta della traiettorie ottime da inseguire. In questo campo il candidato ha sviluppato particolari strutture dinamiche non lineari che automaticamente generano le traiettorie ottime “a tempo minimo” e “senza overshoot” compatibili con opportuni vincoli che possono essere imposti alle variabili di stato del sistema fisico in oggetto come, per esempio, la saturazione degli ingressi o il valore massimo ammissibile per variabili di stato del tipo: coppia, velocità, accelerazione, jerk, ecc. Inizialmente il generatore di traiettorie è stato sviluppato per sistemi del secondo ordine tempo-continuo e tempo-discreto [45], [37], [33], [10], [8]. Successivamente il generatore è stato esteso anche al caso dei sistemi del terzo ordine sia tempo-continui che tempo-discreti [28], [7]. I risultati più significativi dell'attività di ricerca svolta in questo campo sono stati: 1) la determinazione della legge di controllo che nel caso dei sistemi tempo-discreti del terzo ordine garantisce l'inseguimento del segnale di riferimento in tempo minimo e senza overshoot [7]; 2) la determinazione della legge di controllo che nel caso dei sistemi tempo-continui del terzo ordine garantisce tempo minimo e l'assenza di overshoot anche nel caso in cui siano contemporaneamente presenti dei vincoli sul valore massimo di velocità, accelerazione e jerk [28].

- [69] C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, R. Zanasi, “Discrete Time Implementation of a Nonlinear Trajectory Generator”, Technical Report n. DEIS-LAR-03-96, Università di Bologna, Aprile 1996, (G).

- [45] C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, R. Zanasi , “Nonlinear Trajectory Generator”, IECON’96 - 22nd Annual International Conference on the IEEE Industrial Electronics Society, The Lai Lai Sheraton Hotel, Taipei, Taiwan, Agosto 1996, (D).

In [45] viene pubblicata per la prima volta la struttura base del generatore di traiettorie del secondo ordine nel caso tempo-continuo. I risultati presentati sono una evoluzione degli studi preliminari che erano stati scritti sul rapporto interno [69]. In questo articolo viene anche introdotto per la prima volta un opportuno boundary layer nelle vicinanze della superficie di commutazione per evitare l’overshoot nel raggiungimento della posizione finale.

- [37] R. Zanasi, C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, “Nonlinear Filter For Smooth Trajectory Generation”, NOLCOS’98, University of Twente, Enschede, the Netherlands, July 1-3 1998, (D).

Nell’articolo [37] è riportata la prima versione discreta del generatore di traiettorie del secondo ordine. In questo articolo sono contenuti dei risultati preliminari relativi al generatore di traiettorie del secondo ordine, sia tempo-continuo che tempo-discreto, che porteranno successivamente alla pubblicazione dell’articolo [10]. Rispetto a quest’ultimo, in [37] la legge di controllo proposta ha una forma già efficace, ma non ancora ottimizzata.

- [33] R. Zanasi, R. Morselli, “Second Order Smooth Trajectory Generator with Nonlinear Constraints”, European Control Conference - ECC’01, Porto, Portugal, pp. 1518-1523, 4-7 September 2001, ISBN: 972-752-047-2, (D).

In [33] viene presentato un generatore di traiettorie tempo-continuo del secondo ordine che è in grado di garantire l’inseguimento senza overshoot dei segnali di riferimento nel caso in cui si abbiano vincoli non lineari sia sulla massima accelerazione, $|\ddot{x}| \leq U_M(\dot{x})$, che sulla massima velocità, $\dot{x}_{M-} \leq \dot{x} \leq \dot{x}_{M+}$. Con l’introduzione di un opportuno boundary-layer non lineare nelle vicinanze della curva teorica di commutazione è possibile garantire che il segnale di controllo sia sempre “continuo”. Quando l’ampiezza del “boundary layer” tende a zero, l’azione di controllo diventa discontinua e la traiettoria generata dal sistema diventa quella a tempo minimo.

- [28] R. Zanasi, R. Morselli, “Third Order Trajectory Generator Satisfying Velocity, Acceleration and Jerk Constraints”, IEEE CCA/CACSD 2002 Conference, Glasgow, Scozia, pp. 1165-1170, 18-20 September 2002, ISBN: 0-7803-7387-1, (D).

L’articolo [28] estende al caso tridimensionale l’analisi del generatore di traiettorie del tipo “tempo-continuo”. In particolare si determina la struttura di un nuovo regolatore che garantisce il perfetto inseguimento dei segnali di riferimento, in “tempo minimo” e “senza overshoot”, anche nel caso in cui vi siano contemporaneamente dei vincoli sulla velocità $V_{min} \leq \dot{x} \leq V_{max}$, sull’accelerazione $A_{min} \leq \ddot{x} \leq A_{max}$ e sul jerk $|\dddot{x}| \leq U$. Come caso particolare si ottiene anche la struttura del generatore di traiettorie del secondo ordine con limiti sulla velocità e sull’accelerazione.

- [27] R. Morselli, R. Zanasi, “Positioning Trajectory Generator with Nonlinear Constraints”, IEEE CCA/CACSD 2002 Conference, Glasgow, Scozia, pp.1177-1182, 18-20 September 2002, ISBN: 0-7803-7387-1, (D).

In [27] viene presentato un generatore di traiettorie del secondo ordine per sistemi tempo-continui in grado di filtrare i tipici segnali di riferimento (gradini, rampe, ecc.) fornendo in uscita un segnale continuo $x(t)$ che soddisfa vincoli del tipo: $V_{min} \leq \dot{x} \leq V_{max}$ e $|\ddot{x}| = u \leq U_M(x)$. Questi vincoli possono cambiare durante il normale funzionamento del sistema senza pregiudicarne la stabilità. Inoltre, con questo generatore si ottengono traiettorie a tempo minimo senza overshoot.

- [25] R. Zanasi, R. Morselli, A. Visconti, “Generation of Acceleration Profiles for Smooth Gear Shift Operations”, 28-th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON’02, Sevilla, Spain, 5-8 November, 2002, ISBN: 0-7803-7474-4, (D).

In [25], il generatore di traiettorie del terzo ordine è stato utilizzato per calcolare i profili di accelerazione da imporre al veicolo per minimizzare l’ampiezza delle oscillazioni della testa del passeggero, o del guidatore, durante i cambi di marcia. In questo articolo si utilizza il modello dinamico del sistema “testa-collo” messo a punto in [26]. Il principale risultato dell’articolo è quello di mettere in evidenza che il profilo ottimo di accelerazione (e quindi di coppia) che minimizza le oscillazioni della testa del passeggero è sensibilmente diverso da quello trapezoidale che oggigiorno tipicamente viene utilizzato. Il generatore di traiettorie proposto possiede l’interessante proprietà di poter essere riconfigurato al volo (in termini di accelerazione massima desiderata) durante il normale funzionamento del sistema.

- [10] R. Zanasi, C. Guarino Lo Bianco, A. Tonielli, “Nonlinear Filter for the Generation of Smooth Trajectories”, Automatica, vol. 36, pp. 439-448, 2000, (B).

Nell’articolo [10] viene presentato un nuovo generatore di traiettorie, basato su di un controllore non lineare a struttura variabile, particolarmente utile per la generazione di traiettorie nel campo del “motion control”. Tale sistema è in grado di “filtrare” i tipici segnali di riferimento (gradino, rampa, ecc.) fornendo in uscita un segnale che soddisfa dei vincoli, definibili a piacere dall’utente, sulle derivate temporali massime e minime della traiettoria desiderata. Tali vincoli possono essere modificati in linea durante il normale funzionamento del sistema senza pregiudicare la stabilità e la funzionalità del sistema. Si dimostra inoltre che la traiettoria generata è quella che garantisce una transizione “in tempo minimo” e senza “overshoot”. Il generatore di traiettorie considerato è quello del secondo ordine e viene analizzato sia nella versione tempo-continua che tempo-discreta. Il principale contributo del lavoro riguarda la versione tempo-discreta: si dimostra che il controllore discreto a tempo minimo è composto da una collezione di regolatori “lineari”, ognuno dei quali è attivo in una particolare regione del piano delle fasi. Le caratteristiche del generatore proposto vengono anche verificate in simulazione relativamente ad un caso pratico di inseguimento di un segnale a dente di sega nel controllo di un utensile che opera su di una linea di assemblaggio.

- [7] R. Zanasi, R. Morselli, “Discrete Minimum Time Tracking Problem for a Chain of Three Integrators with Bounded Input”, *Automatica*, vol. 39, pp. 1643-1649, 2003, ISSN: 0005-1098, (B).

L’articolo [7] estende al caso tridimensionale i risultati teorici che in [10] erano stati ottenuti per il generatore di traiettorie bidimensionale a tempo-discreto. Nonostante la maggiore complessità del problema, nell’articolo si mostra come mediante l’utilizzo di particolari trasformazioni nello spazio degli stati sia possibile ottenere un regolatore discreto che, pur mantenendo una struttura estremamente semplice, garantisce l’inseguimento perfetto del segnale di riferimento in “tempo minimo” e “senza sovraelongazione”. Nell’articolo si dimostra che anche per il caso tridimensionale il regolatore discreto a tempo minimo è costituito da un insieme numerabile di regolatori “lineari”, ognuno dei quali è attivo in una particolare regione dello spazio degli stati. Le superfici che delimitano queste regioni hanno delle proprietà estremamente interessanti che nell’articolo sono state evidenziate con particolare attenzione. Risultati simulativi confermano la correttezza dei risultati teorici presentati.

- [8] C. Guarino Lo Bianco, R. Zanasi, “Smooth profile generation for a tile printing machine”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 50, n. 3, pp. 471-477, June 2003, ISSN 0278-0046 (B).

L’articolo [8] descrive l’utilizzo di un generatore di traiettorie del secondo ordine, del tipo di quello proposto in [10], nel caso di un’applicazione reale di controllo di una macchina per la stampa di piastrelle posizionate in modo non regolare su di una linea di trasporto in movimento. Nell’articolo vengono riportati sia dei risultati teorici, riguardanti principalmente la gestione a tempo minimo delle condizioni iniziali che non rispettano i vincoli voluti, sia dei risultati sperimentali ottenuti durante il reale funzionamento della macchina.

9.5 Problemi di controllo in ambito “automotive”

Negli ultimi anni il candidato ha attivato numerose collaborazioni di ricerca con importanti aziende che operano nel settore “automotive” quali per esempio la Società Ferrari S.p.A. e la Società Case-New Holland Italia. Tali collaborazioni hanno portato il candidato ad approfondire numerose tematiche di controllo in questo settore. In particolare, sono state affrontate tematiche riguardanti il controllo di un sistema frizione [19], [20], il controllo di coppia di un sistema di trasmissione [34], il controllo elettronico di un cambio marcia [21], di un servosterzo [18], di un differenziale [24], ecc. La tecnica modellistica “Power-Oriented Graphs” è stata estesamente utilizzata per descrivere in modo semplice e diretto il modello dinamico, quasi sempre non lineare, di quasi tutti i sistemi elettromeccanici, anche complessi, presi in considerazione.

- [34] R. Zanasi, A. Visconti, G. Sandoni, R. Morselli, “Dynamic Modeling and Control of a Car Transmission System”, 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics - AIM ’01, Como, vol. 1, pp. 416-421, 9-11 July 2001, ISBN: 0-7803-6737-5, (D).

Nell'articolo [34] viene presentato il modello dinamico del sistema di trasmissione di un'autovettura e viene proposta una strategia per il controllo della coppia trasmessa. Tutti i principali componenti del sistema di trasmissione (il motore, la frizione, il cambio, il differenziale, ecc.) sono stati descritti utilizzando la tecnica modellistica Power-Oriented Graphs. Il sottosistema "frizione con parastrappi" ha una dimensione dinamica variabile, per cui è stato descritto e simulato utilizzando la metodologia presentata in [32]. Nell'articolo viene presentata anche una semplice strategia per controllare la coppia trasmessa all'autovettura durante le "partenze" . I risultati simulativi riportati nell'articolo dimostrano la correttezza del modello dinamico utilizzato e l'efficacia della strategia di controllo proposta.

- [32] R. Zanasi, G. Sandoni, R. Morselli, "Simulation of Variable Dynamic Dimension Systems: the Clutch Example", European Control Conference - ECC'01, Porto, Portugal, pp. 3149-3154, 4-7 September 2001, ISBN: 972-752-047-2, (D).

L'articolo [32] prende in considerazione i sistemi a struttura dinamica variabile, cioè i sistemi che cambiano la dimensione del vettore di stato durante il loro normale funzionamento. La simulazione di questo tipo di sistemi è tipicamente difficoltosa perchè richiede una continua gestione di più modelli simulativi, delle relative condizioni iniziali e delle politiche di passaggio da un modello all'altro. Nell'articolo viene proposto un particolare modo di rappresentare i sistemi a struttura dinamica variabile che ne facilita la simulazione in tutte le condizioni operative. Il metodo viene presentato facendo riferimento ad un sistema di n masse che interagiscono tra di loro solo tramite attriti coulombiani. La trasformazione di coordinate che viene proposta tende a separare la "dinamica principale" del sistema, cioè quella che è sempre attiva, da tutte quelle "relative", cioè quelle che scompaiono quando la dimensione dinamica del sistema decade. La politica di passaggio da una condizione dinamica all'altra viene gestita calcolando il controllo equivalente di un opportuno sistema multidimensionale a struttura variabile. Nell'articolo, il metodo proposto viene applicato alla simulazione di un sistema composto da quattro masse.

- [31] R. Zanasi, G. Sandoni, A. Visconti "Dynamic Model and Control of a Gearbox System", Mechatronics 2002, Twente, Enschede, Netherlands, June 24-26 2002, (D).

In [31] viene presentato il modello dinamico POG di un sistema di cambio marcia ad ingranaggi inserito all'interno del sistema di trasmissione di un'autovettura. Viene inoltre fornita una semplice strategia per controllare la coppia trasmessa durante i cambi marcia. Risultati simulativi dimostrano l'efficacia della tecnica di controllo proposta.

- [26] R. Zanasi, R. Morselli, A. Visconti, M. Cavanna, "Head-neck model for the evaluation of passenger's comfort", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS'02, Lausanne, Switzerland, pp.1403-1408, September 30 - October 4, 2002, ISBN: 0-7803-7398-7, (D).

In [26] viene presentato un modello dinamico che descrive il comportamento fisico del sistema testa-collo di un passeggero di un'autovettura. Lo scopo del modello è quello di valutare le sollecitazioni dell'apparato muscolare del passeggero durante i cambi marcia.

Dall'analisi dei dati sperimentali forniti dalla Società Ferrari S.p.A. è stato anche possibile individuare un semplice modello dinamico che descrive bene la reazione del passeggero alle sollecitazioni esterne. In simulazione si sono ottenuti dei risultati che concordano molto bene con i dati sperimentali.

- [24] R. Zanasi, G. Sandoni, R. Morselli, "Mechanical and Active Car Differentials: Detailed and Reduced Dynamic Models", Symposium on Mathematical Modeling - MATHMOD 2003, Vienna, Austria, 5-7 February 2003, pp. 1011-1020, ISBN 3-901608-24-9, (D).

Nell'articolo [24] la tecnica modellistica POG viene utilizzata per ricavare, sia nella forma "estesa" che nella forma "ridotta", i modelli dinamici di 4 diversi tipi di differenziale (convenzionale, meccanico, attivo ed evoluto) tipicamente utilizzati dall'industria automobilistica.

- [22] A. Bertacchini, R. Morselli, R. Zanasi, P. Pavan, A. Bertoli, "Control Structures and Physical Requirements for Steer-by-Wire Systems", International Congress on Mechatronics - MECH2K3, Graz, Austria, 14-17 luglio, 2003, (D).
- [23] R. Morselli, A. Bertacchini, P. Ferrari, P. Pavan, R. Zanasi, "Energetic Approach for Steer-by-Wire in Off-Highway Vehicles", International Conference in Control and Diagnostics in Automotive Applications - CD AUTO'03, Sestri Levante (GE), Italia, 18-20 June, 2003, (D).

Gli articoli [22] e [23] fanno parte di una linea di ricerca recentemente attivata che ha come obiettivo quello di analizzare le strutture di controllo più adatte da utilizzare nei sistemi di tipo "steer-by-wire".

- [21] R. Zanasi, G. Sandoni, R. Morselli, A. Visconti, F. Baldet, F. Farachi, "Dynamic Models and Control of an AMT Actuator System", International Congress on Mechatronics - MECH2K3, Graz, Austria, 14-17 luglio, 2003, (D).

In [21] viene presentato il modello dinamico dettagliato di un attuatore elettro-idraulico che aziona una frizione a secco all'interno di un sistema Automated Manual Transmission (AMT). Il modello prende in considerazione tutti i principali componenti del sistema: il sistema idraulico di alimentazione, l'elettrovalvola controllata, le connessioni idrauliche e la frizione a secco. Il modello dinamico proposto viene validato confrontando i risultati simulativi con quelli sperimentali.

- [19] R. Morselli, R. Zanasi, E. Sereni, E. Bedogni, E. Sedoni, "Modeling and Control of Wet Clutches by Pressure-control Valves", accepted for the IFAC Symposium on Advances in Automotive Control - AAC'04, Salerno, Italia, April 19-23, 2004, (D).
- [20] R. Morselli, R. Zanasi, R. Cirrone, E. Sereni, E. Bedogni, E. Sedoni, "Dynamic Modeling and Control of Electro-Hydraulic Wet-Clutches", IEEE 6th International Conference On Intelligent Transportation Systems, Shanghai, China, October 12-15, 2003, ISBN 0-7803-8126-2, (D).

I due articoli [19] e [20] fanno parte di una nuova linea di ricerca che ha come obiettivo quello di studiare il comportamento dinamico delle frizioni in bagno d'olio comandate da un circuito elettro-idraulico. L'obiettivo futuro è quello di giungere alla definizione di nuove strategie di controllo che permettano di migliorare il funzionamento di queste frizioni nelle normali condizioni operative.

- [18] R. Morselli, M. Borsari, R. Zanasi, A. Visconti, “Artificial Sensitivity for Power Steering: the Proactive Safety Steering Control”, accepted for the IFAC Symposium on Advances in Automotive Control - AAC'04, Salerno, Italia, April 19-23, 2004, (D).

L'articolo [18] propone una nuova strategia di controllo per un servosterzo di tipo elettro-idraulico che aiuti il “guidatore medio” a percepire in anticipo l'avvicinarsi delle condizioni limite di aderenza della macchina prima che queste vengano effettivamente raggiunte. Questo tipo di controllo crea una sensibilità artificiale nell'uso del servosterzo che ha come scopo finale quello di migliorare la sicurezza di guida.

9.6 Altre tematiche di controllo

In parallelo alle attività di ricerca sopra descritte, il candidato si è occupato anche di altre tematiche nel settore dei controlli.

- [36] G. Marro, R. Zanasi, “New Formulae and Graphics for Compensator Design”, IEEE International Conference on Control Applications, Trieste, 1-4 September 1998, ISBN 0-7803-4107-4, (D).

Nell'articolo [36], svolto in collaborazione con il Prof. G. Marro sono state sviluppate semplici “formule di inversione” che permettono la sintesi delle reti correttive di uso più comune (anticipatrice, ritardatrice e a ritardo e anticipo) in modo semplice e diretto. Uno degli aspetti più interessanti di queste formule di inversione è la loro chiara interpretazione geometrica sul piano complesso di Nyquist;

- [29] R. Zanasi, G. Sandoni, “Electronic Control of a Multi-Phase Lighting System”, 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, July 21-26, 2002, (D).
- [30] R. Zanasi, G. Sandoni, “Modeling and Electronic Control of a Lighting System”, IEEE-ISIE'2002, L'Aquila, Italy, July 8-11 2002, (D).

Negli articoli [29] e [30] viene trattata la modellistica e il controllo elettronico multifase di un sistema di illuminazione pubblica.

- [61] R. Zanasi, L. Diacci, “Celle di Carico ad Estensimetri Elettrici: i Vantaggi di una Soluzione Digitale”, Automazine e Strumentazione, anno LI, n. 9, pp. 59-63, Ottobre 2003, (E).

L'articolo [61] fa riferimento ad una attività di messa a punto di algoritmi per la compensazione degli effetti di isteresi in dispositivi per la misura delle forze e in particolare per le celle di carico. L'algoritmo non lineare di natura discreta messo a punto in questo ambito è diventato oggetto di un brevetto attualmente attivo a livello europeo.

- [1] R. Zanasi, “Esercizi di Controlli Automatici - Compiti d’esame svolti”, Esculapio, Progetto Leonardo, Bologna 1999, (A).
- [3] C. Bonivento, C. Melchiorri, A. Tonielli, R. Zanasi, “ Controllo dei processi: schemi di lezione ed esercizi”, Pitagora, Bologna, Gennaio 1996, (A).
- [4] C. Bonivento, C. Melchiorri, R. Zanasi, “ Sistemi di Controllo Digitale”, Esculapio Editore, Collana: Progetto Leonardo, Bologna, Dicembre 1995 (ristampa), (A).
- [64] C. Bonivento, C. Melchiorri, R. Zanasi, “Configurazioni e Dispositivi di Ingegnerizzazione dei Regolatori PID Digitali”, “ Automazione e Strumentazione”, pp. 103-110, Gennaio 1996, (E).
- [67] R. Zanasi, “Esercizi e Test di Controlli Automatici”, Technical Report n. DEIS-LAR-11-96, Università di Bologna, Maggio 1996, (G).

I libri [1], [3], [4], [67] e l’articolo [64] testimoniano l’impegno svolto dal candidato nel preparare materiale didattico che potesse essere di ausilio agli studenti nella preparazione dei vari insegnamenti di cui il candidato è stato docente e/o esercitatore.

Modena, 7 Novembre 2003

In fede,

Zanasi Roberto