

Prefazione

Negli ultimi venticinque anni la *robotica* ha stimolato notevole interesse in un numero sempre crescente di studiosi, provocando una cospicua produzione letteraria sia in termini di libri di testo e monografie scientifiche, sia di riviste specializzate dedicate alla robotica. Questo forte interesse è anche da attribuire al carattere interdisciplinare della robotica, scienza che affonda le sue radici in settori diversi; la cibernetica, la meccanica, l'automatica, l'informatica, la bioingegneria, l'elettronica —per citare le più importanti— sono tutte aree culturali che indubbiamente hanno dato linfa allo sviluppo di questa scienza.

Nonostante la robotica rappresenti una disciplina ancora relativamente giovane, i suoi fondamenti sono da ritenersi oramai ben assestati nel panorama letterario classico relativamente ai libri di testo. Tra questi, la *modellistica*, la *pianificazione* e il *controllo* rivestono un ruolo basilare, non solo nel contesto tradizionale della robotica industriale, ma anche per gli scenari avanzati dei robot per l'esplorazione e dei robot di servizio, campi di ricerca che hanno riscontrato grande fermento negli ultimi quindici anni.

Questo libro è la naturale evoluzione del precedente testo *Robotica Industriale: Modellistica e Controllo di Manipolatori* a firma dei primi due autori, pubblicato nel 1995, e in seconda edizione nel 2000. L'impostazione che ha contraddistinto l'opera originale è stata confermata con l'obiettivo, prevalentemente didattico e formativo, di coniugare gli aspetti fondamentali e tecnologici con quelli innovativi in una trattazione uniforme sempre caratterizzata dal rispetto di un formalismo rigoroso.

Gli aspetti fondamentali e quelli tecnologici sono prevalentemente concentrati nei primi sei capitoli del testo e riguardano la teoria delle strutture di manipolazione, con la trattazione della cinematica, della statica e della pianificazione di traiettorie, e la tecnologia degli attuatori, dei sensori e dell'unità di governo di un robot.

Gli aspetti innovativi sono approfonditi nei successivi sei capitoli e riguardano la dinamica e il controllo del moto dei manipolatori, l'interazione con l'ambiente con l'uso di informazioni sensoriali esteroceettive (forza e visione), i robot mobili e la pianificazione del moto.

I contenuti del libro sono organizzati in 12 capitoli e 5 appendici.

Nel Capitolo 1 vengono evidenziate, nel contesto generale della robotica, le differenze tra le applicazioni *industriali* e quelle *avanzate*. Vengono presentate le strutture meccaniche di riferimento sia per i robot manipolatori, sia per i robot mobili su ruote. Sono inoltre introdotti gli argomenti sviluppati nei capitoli successivi.

Nel Capitolo 2 viene presentata la *cinematica* dei manipolatori con un approccio sistematico e generale che fa riferimento alla convenzione di Denavit-Hartenberg. Viene quindi formulata l'*equazione cinematica diretta* che lega le variabili di spazio dei giunti alle variabili di spazio operativo. Tale equazione viene utilizzata per la determinazione dello spazio di lavoro di un manipolatore, nonché per la derivazione di una tecnica di calibrazione cinematica. Viene inoltre analizzato il *problema cinematico inverso* e si ricavano soluzioni analitiche per strutture tipiche di manipolazione.

La *cinematica differenziale* è presentata nel Capitolo 3. La relazione tra le velocità dei giunti e le velocità lineare e angolare dell'organo terminale è caratterizzata dallo *Jacobiano* geometrico, di cui si evidenzia la differenza con lo Jacobiano analitico. Lo Jacobiano costituisce uno strumento fondamentale per la caratterizzazione di un manipolatore, in quanto consente la determinazione delle configurazioni singolari, l'analisi della ridondanza e la descrizione della relazione tra forze e momenti applicati all'organo terminale e forze e coppie risultanti ai giunti in situazioni di equilibrio (*statica*). Lo Jacobiano consente inoltre di formulare *algoritmi per l'inversione cinematica* che risolvono il problema cinematico inverso anche per manipolatori per cui non esistono soluzioni analitiche.

Nel Capitolo 4 vengono illustrate tecniche per la *pianificazione di traiettorie* che riguardano la determinazione di polinomi interpolatori per sequenze di punti desiderati. Vengono affrontati il caso di moto punto-punto e quello di moto attraverso una sequenza di punti. La generazione di traiettorie è considerata sia nello *spazio dei giunti* sia nello *spazio operativo*, con particolare riguardo per quest'ultimo al problema dell'orientamento.

Il Capitolo 5 è dedicato alla presentazione di *attuatori e sensori*. Dopo aver illustrato le caratteristiche generali di un sistema di attuazione, vengono presentate le modalità di controllo degli *azionamenti* elettrici e di quelli idraulici. Sono quindi descritti i sensori propriocettivi e i sensori esteroceettivi di maggiore uso in robotica.

Nel Capitolo 6 viene illustrata l'architettura funzionale di principio per l'*unità di governo* di un robot. Sono presentate le caratteristiche degli ambienti di programmazione con enfasi sulla programmazione per insegnamento e su quella orientata al robot. Viene infine discusso un modello di principio per l'architettura hardware dell'unità di governo di un robot industriale.

Il Capitolo 7 presenta la derivazione della *dinamica* di un manipolatore che gioca un ruolo fondamentale per la simulazione del moto, per l'analisi delle strutture di manipolazione e per la sintesi degli algoritmi di controllo. Il modello dinamico è ricavato considerando due approcci che si basano rispettivamente sulla formulazione di *Lagrange* e sulla formulazione di *Newton-Eulero*. Il primo è concettualmente più semplice e sistematico, mentre il secondo consente la derivazione del modello in forma ricorsiva. Vengono evidenziate proprietà notevoli del modello dinamico, tra cui la proprietà di linearità nei parametri che viene utilizzata per sviluppare una tecnica di identificazione del modello. Vengono infine presentate le trasformazioni che consentono di esprimere il modello dinamico nello spazio operativo.

Nel Capitolo 8 viene trattato il problema del *controllo del moto* nello spazio

libero. Viene puntualizzata la distinzione tra strategie di controllo *decentralizzato* e strategie di controllo *centralizzato* nello spazio dei giunti. Con riferimento alle prime, viene presentata la tecnica di *controllo indipendente ai giunti* che trova applicazione nei robot industriali. Come premessa al controllo centralizzato, viene introdotta la tecnica di compensazione in avanti a coppia precalcolata. Vengono quindi trattati schemi che richiedono il calcolo in linea di termini del modello dinamico, quali il controllo PD con compensazione di gravità, il *controllo a dinamica inversa*, il controllo robusto e quello adattativo. Le tecniche centralizzate vengono estese al caso del *controllo nello spazio operativo*.

Il *controllo di forza* di un manipolatore in contatto con l'ambiente di lavoro viene affrontato nel Capitolo 9. Sono definiti i concetti di *cedevolezza* e *impedenza* meccanica come naturale estensione degli schemi di controllo nello spazio operativo al caso di moto vincolato. Vengono quindi presentati schemi di controllo di forza, ottenuti modificando schemi di controllo del moto con l'aggiunta di un anello esterno di retroazione in forza. La strategia di *controllo ibrido forza/moto* viene infine presentata con riferimento alla formulazione dei vincoli naturali e artificiali che caratterizzano un compito di interazione.

Nel Capitolo 10 viene introdotto il *controllo visuale* che consente la gestione di informazioni sull'ambiente in cui opera il sistema robotico. Vengono risolte le problematiche relative alla *stima di posizione e orientamento* della telecamera rispetto agli oggetti presenti nella scena, ricorrendo a tecniche sia analitiche sia numeriche. Dopo aver presentato i vantaggi conseguibili con la *visione stereo* e una opportuna *calibrazione* della telecamera, vengono illustrate le due principali strategie di controllo visuale, rispettivamente nello *spazio operativo* e nello *spazio delle immagini*, i cui vantaggi possono essere efficacemente combinati nello schema di *controllo visuale ibrido*.

I *robot mobili* su ruote sono oggetto della trattazione nel Capitolo 11, che estende alcuni aspetti di modellistica, pianificazione e controllo dei precedenti capitoli. Per la modellistica, è significativo distinguere tra *modello cinematico*, caratterizzato fortemente dal tipo di vincolo imposto dal rotolamento delle ruote, e *modello dinamico* che tiene conto delle forze agenti sul robot. La struttura particolare del modello cinematico viene opportunamente utilizzata per lo sviluppo di tecniche di *pianificazione* sia di *cammini* sia di *traiettorie*. Il problema del *controllo* viene affrontato in relazione a due compiti di moto fondamentali: l'*inseguimento di traiettorie* e la *regolazione di configurazione*. Si evidenzia infine come l'implementazione degli schemi di controllo si avvalga di metodi di *localizzazione odometrica*.

Il Capitolo 12 riprende il problema della pianificazione trattato nei Capitoli 4 e 11 rispettivamente per i robot manipolatori e mobili, nel caso in cui siano presenti ostacoli nello spazio di lavoro. In tale contesto ci si riferisce alla *pianificazione del moto*, che viene formulata in maniera efficiente nello *spazio delle configurazioni*. Vengono quindi presentate diverse tecniche di pianificazione per *robot mobili*: mediante ritrazione, mediante decomposizione in celle, probabilistica, mediante potenziali artificiali; viene infine discussa l'estensione al caso dei *robot manipolatori*.

Questo capitolo conclude la presentazione dei contenuti tematici del testo;

seguono cinque appendici che sono state inserite per richiamare nozioni metodologiche propedeutiche.

L'Appendice A è dedicata all'*algebra lineare* e presenta le nozioni fondamentali su matrici, vettori e relative operazioni.

L'Appendice B richiama quei concetti di base della *meccanica dei corpi rigidi* che sono necessari allo studio della cinematica, della statica e della dinamica dei robot.

L'Appendice C illustra i principi del *controllo in retroazione* per sistemi lineari e presenta una metodologia basata sulla teoria di Lyapunov per il controllo di sistemi non lineari.

L'Appendice D tratta alcuni concetti di *geometria differenziale* necessari al controllo dei sistemi meccanici soggetti a vincoli anolonomi.

L'Appendice E è concentrata sugli *algoritmi di ricerca su grafo* e sulla loro complessità in vista dell'applicazione nei metodi di pianificazione del moto.

L'organizzazione degli argomenti secondo lo schema appena illustrato consente l'adozione del libro come testo di riferimento sia per un corso al terzo anno delle lauree di primo livello in ingegneria automatica, elettronica, gestionale, informatica e meccanica, sia per un corso delle corrispondenti lauree di secondo livello, o anche per corsi monografici a livello dottorale.

Da un punto di vista pedagogico, i vari argomenti sono sviluppati secondo un livello crescente di difficoltà. Sono sollevati i problemi e si propongono strumenti adatti alla individuazione di soluzioni di interesse applicativo. Ogni capitolo è preceduto da un breve sommario che chiarisce contenuti e finalità degli argomenti trattati. Alla presentazione degli argomenti necessari per una proficua lettura del testo sono dedicate cinque appendici, il cui scopo è anche quello di fornire una base di conoscenza omogenea a studenti di diversa estrazione.

Il libro contiene 310 illustrazioni e più di 60 tra esempi e casi di studio sviluppati nel corso del testo con ampio ricorso alla simulazione. I risultati della implementazione al calcolatore (in MATLAB con Simulink) degli algoritmi per l'inversione cinematica, delle tecniche di pianificazione di traiettorie, del calcolo della dinamica inversa, degli algoritmi di controllo del moto, di forza e visuale per robot manipolatori e di controllo del moto per robot mobili sono presentati con dovizia di particolari al fine di facilitare la comprensione della trattazione teorica e accrescere la sensibilità ai problemi pratici dell'applicazione. Sono proposti 150 problemi, alcuni dei quali contengono materia di approfondimento della trattazione nel testo. Particolare attenzione è stata posta nella selezione dei riferimenti bibliografici (più di 250) che sono richiamati alla fine di ciascun capitolo, in relazione allo sviluppo storico della materia.

Infine, gli Autori desiderano ringraziare coloro che sono stati di aiuto nella preparazione di questo libro.

Relativamente all'opera originale, alla base del testo attuale, un particolare ringraziamento va a Pasquale Chiacchio e Stefano Chiaverini per i loro contributi alla stesura, rispettivamente, del capitolo sulla pianificazione di traiettorie e del capitolo sul controllo di forza. Fabrizio Caccavale e Ciro Natale sono stati di grande aiuto per la revisione del materiale per la seconda edizione.

Una nota speciale di ringraziamento va ad Alessandro De Luca per la lettura

puntuale e critica di ampie porzioni del testo, nonché a Vincenzo Lippiello, Agostino De Santis, Marilena Vendittelli e Luigi Freda per i loro contributi e commenti su alcuni paragrafi.

Napoli e Roma, gennaio 2008

Bruno Siciliano
Lorenzo Sciavicco
Luigi Villani
Giuseppe Oriolo