

Prefazione	xv
1 Introduzione	1
1.1 La robotica	1
1.2 Struttura meccanica dei robot	3
1.2.1 Robot manipolatori	4
1.2.2 Robot mobili	10
1.3 Robotica industriale	15
1.4 Robotica avanzata	25
1.4.1 Robot per l'esplorazione	26
1.4.2 Robot di servizio	27
1.5 Modellistica, pianificazione e controllo di robot	30
1.5.1 Modellistica	30
1.5.2 Pianificazione	32
1.5.3 Controllo	33
Riferimenti bibliografici	34
2 Cinematica	39
2.1 Posa di un corpo rigido	39
2.2 Matrice di rotazione	40
2.2.1 Rotazioni elementari	41
2.2.2 Rappresentazione di un vettore	42
2.2.3 Rotazione di un vettore	44
2.3 Composizione di matrici di rotazione	45
2.4 Angoli di Eulero	49
2.4.1 Angoli ZYZ	49
2.4.2 Angoli RPY	51
2.5 Asse e angolo	53
2.6 Quaternione unitario	55
2.7 Trasformazioni omogenee	56
2.8 Cinematica diretta	58
2.8.1 Catena aperta	61
2.8.2 Convenzione di Denavit–Hartenberg	62
2.8.3 Catena chiusa	65
2.9 Cinematica di strutture tipiche di manipolazione	69
2.9.1 Manipolatore planare a tre bracci	69

2.9.2	Manipolatore a parallelogramma	71
2.9.3	Manipolatore sferico	73
2.9.4	Manipolatore antropomorfo	74
2.9.5	Polso sferico	75
2.9.6	Manipolatore di Stanford	76
2.9.7	Manipolatore antropomorfo con polso sferico	78
2.9.8	Manipolatore del DLR	79
2.9.9	Manipolatore umanoide	82
2.10	Spazio dei giunti e spazio operativo	84
2.10.1	Spazio di lavoro	86
2.10.2	Ridondanza cinematica	88
2.11	Calibrazione cinematica	89
2.12	Problema cinematico inverso	91
2.12.1	Soluzione del manipolatore planare a tre bracci	92
2.12.2	Soluzione di manipolatori con polso sferico	95
2.12.3	Soluzione del manipolatore sferico	96
2.12.4	Soluzione del manipolatore antropomorfo	98
2.12.5	Soluzione del polso sferico	100
	Riferimenti bibliografici	101
	Problemi	102
3	Cinematica differenziale e statica	105
3.1	Jacobiano geometrico	105
3.1.1	Derivata di una matrice di rotazione	106
3.1.2	Velocità di un braccio	109
3.1.3	Calcolo dello Jacobiano	111
3.2	Jacobiano di strutture tipiche di manipolazione	113
3.2.1	Manipolatore planare a tre bracci	114
3.2.2	Manipolatore antropomorfo	115
3.2.3	Manipolatore di Stanford	116
3.3	Singularità cinematiche	116
3.3.1	Disaccoppiamento di singularità	118
3.3.2	Singularità di polso	119
3.3.3	Singularità di struttura portante	120
3.4	Analisi della ridondanza	121
3.5	Inversione della cinematica differenziale	123
3.5.1	Manipolatori ridondanti	124
3.5.2	Singularità cinematiche	127
3.6	Jacobiano analitico	128
3.7	Algoritmi per l'inversione cinematica	133
3.7.1	(Pseudo-)inversa dello Jacobiano	134
3.7.2	Trasposta dello Jacobiano	135
3.7.3	Errore di orientamento	138
3.7.4	Algoritmi del secondo ordine	142
3.7.5	Confronto tra gli algoritmi per l'inversione cinematica	144
3.8	Statica	148

3.8.1	Dualità cineto–statica	150
3.8.2	Trasformazione di velocità e forze	151
3.8.3	Catena chiusa	153
3.9	Ellissoidi di manipolabilità	154
	Riferimenti bibliografici	160
	Problemi	161
4	Pianificazione di traiettorie	165
4.1	Percorso e traiettoria	165
4.2	Traiettorie nello spazio dei giunti	166
4.2.1	Moto punto–punto	167
4.2.2	Moto attraverso una sequenza di punti	173
4.3	Traiettorie nello spazio operativo	183
4.3.1	Primitive di percorso	185
4.3.2	Posizione	189
4.3.3	Orientamento	191
	Riferimenti bibliografici	193
	Problemi	194
5	Attuatori e sensori	195
5.1	Sistema di attuazione dei giunti	195
5.1.1	Organi di trasmissione	196
5.1.2	Servomotori	197
5.1.3	Amplificatori di potenza	201
5.1.4	Sorgenti di alimentazione	202
5.2	Azionamenti	202
5.2.1	Azionamenti elettrici	203
5.2.2	Azionamenti idraulici	207
5.2.3	Effetti di un riduttore meccanico	208
5.2.4	Controllo di posizione	211
5.3	Sensori propriocettivi	214
5.3.1	Trasduttori di posizione	215
5.3.2	Trasduttori di velocità	218
5.4	Sensori esteroceettivi	219
5.4.1	Sensori di forza	219
5.4.2	Sensori di distanza	223
5.4.3	Sensori di visione	229
	Riferimenti bibliografici	234
	Problemi	235
6	Unità di governo	237
6.1	Architettura funzionale	237
6.2	Ambiente di programmazione	242
6.2.1	Programmazione per insegnamento	244
6.2.2	Programmazione orientata al robot	245
6.3	Architettura hardware	246

	Riferimenti bibliografici	249
	Problemi	249
7	Dinamica	251
7.1	Formulazione di Lagrange	251
7.1.1	Determinazione dell'energia cinetica	253
7.1.2	Determinazione dell'energia potenziale	259
7.1.3	Equazioni del moto	260
7.2	Proprietà notevoli del modello dinamico	262
7.2.1	Anti-simmetria della matrice $\dot{\mathbf{B}} - 2\mathbf{C}$	262
7.2.2	Linearità nei parametri dinamici	264
7.3	Modello dinamico di strutture semplici di manipolazione	268
7.3.1	Manipolatore cartesiano a due bracci	269
7.3.2	Manipolatore planare a due bracci	270
7.3.3	Manipolatore a parallelogramma	282
7.4	Identificazione dei parametri dinamici	285
7.5	Formulazione di Newton–Eulero	288
7.5.1	Accelerazioni di un braccio	290
7.5.2	Algoritmo ricorsivo	292
7.5.3	Esempio	294
7.6	Dinamica diretta e dinamica inversa	298
7.7	Scalatura dinamica di traiettorie	300
7.8	Modello dinamico nello spazio operativo	302
7.9	Ellissoide di manipolabilità dinamica	305
	Riferimenti bibliografici	307
	Problemi	308
8	Controllo del moto	311
8.1	Il problema del controllo	311
8.2	Controllo nello spazio dei giunti	313
8.3	Controllo decentralizzato	317
8.3.1	Controllo indipendente ai giunti	319
8.3.2	Compensazione in avanti decentralizzata	328
8.4	Compensazione in avanti a coppia precalcolata	333
8.5	Controllo centralizzato	336
8.5.1	Controllo PD con compensazione di gravità	337
8.5.2	Controllo a dinamica inversa	339
8.5.3	Controllo robusto	342
8.5.4	Controllo adattativo	349
8.6	Controllo nello spazio operativo	353
8.6.1	Schemi di principio	354
8.6.2	Controllo PD con compensazione di gravità	356
8.6.3	Controllo a dinamica inversa	357
8.7	Confronto tra gli schemi di controllo	359
	Riferimenti bibliografici	369
	Problemi	370

9	Controllo di forza	373
9.1	Interazione del manipolatore con l'ambiente	373
9.2	Controllo di cedevolezza	375
9.2.1	Cedevolezza passiva	376
9.2.2	Cedevolezza attiva	377
9.3	Controllo di impedenza	382
9.4	Controllo di forza	388
9.4.1	Controllo di forza con anello interno di posizione	389
9.4.2	Controllo di forza con anello interno di velocità	390
9.4.3	Controllo parallelo forza/posizione	391
9.5	Moto vincolato	394
9.5.1	Ambiente rigido	395
9.5.2	Ambiente cedevole	400
9.6	Vincoli naturali e vincoli artificiali	401
9.6.1	Analisi di casi	402
9.7	Controllo ibrido forza/moto	407
9.7.1	Ambiente cedevole	407
9.7.2	Ambiente rigido	412
	Riferimenti bibliografici	414
	Problemi	415
10	Controllo visuale	417
10.1	Visione per il controllo	417
10.1.1	Configurazione del sistema visuale	419
10.2	Elaborazione dell'immagine	420
10.2.1	Segmentazione dell'immagine	421
10.2.2	Interpretazione dell'immagine	425
10.3	Stima della posa	427
10.3.1	Soluzione analitica	428
10.3.2	Matrice di interazione	434
10.3.3	Soluzione algoritmica	437
10.4	Visione stereo	443
10.4.1	Geometria epipolare	443
10.4.2	Triangolazione	445
10.4.3	Orientamento assoluto	446
10.4.4	Ricostruzione 3D da omografia planare	447
10.5	Calibrazione della telecamera	450
10.6	Il problema del controllo visuale	452
10.7	Controllo visuale nello spazio operativo	455
10.7.1	Controllo PD con compensazione di gravità	456
10.7.2	Controllo in velocità	457
10.8	Controllo visuale nello spazio delle immagini	459
10.8.1	Controllo PD con compensazione di gravità	459
10.8.2	Controllo in velocità	461
10.9	Confronto tra gli schemi di controllo	463
10.10	Controllo visuale ibrido	471

Riferimenti bibliografici	475
Problemi	476
11 Robot mobili	479
11.1 Vincoli anolonomi	479
11.1.1 Condizioni di integrabilità	483
11.2 Modello cinematico	486
11.2.1 Uniciclo	488
11.2.2 Biciclo	490
11.3 Forma a catena	492
11.4 Modello dinamico	495
11.5 Pianificazione	499
11.5.1 Separazione cammino–legge oraria	500
11.5.2 Uscite piatte	501
11.5.3 Pianificazione di cammini	502
11.5.4 Pianificazione di traiettorie	508
11.5.5 Traiettorie ottime	509
11.6 Controllo del moto	512
11.6.1 Inseguimento di traiettorie	514
11.6.2 Regolazione	521
11.7 Localizzazione odometrica	525
Riferimenti bibliografici	528
Problemi	529
12 Pianificazione del moto	533
12.1 Il problema canonico	533
12.2 Spazio delle configurazioni	535
12.2.1 Distanza	537
12.2.2 Ostacoli	538
12.2.3 Esempi di ostacoli	538
12.3 Pianificazione mediante ritrazione	542
12.4 Pianificazione mediante decomposizione in celle	546
12.4.1 Decomposizione esatta	546
12.4.2 Decomposizione approssimata	549
12.5 Pianificazione probabilistica	551
12.5.1 Metodo PRM	552
12.5.2 Metodo RRT bidirezionale	553
12.6 Pianificazione mediante potenziali artificiali	556
12.6.1 Potenziale attrattivo	557
12.6.2 Potenziale repulsivo	557
12.6.3 Potenziale totale	559
12.6.4 Tecniche di pianificazione	560
12.6.5 Il problema dei minimi locali	562
12.7 Il caso dei robot manipolatori	565
Riferimenti bibliografici	567
Problemi	568

A	Algebra lineare	571
A.1	Definizioni	571
A.2	Operazioni su matrici	573
A.3	Operazioni su vettori	577
A.4	Trasformazioni lineari	580
A.5	Autovalori e autovettori	581
A.6	Forme bilineari e forme quadratiche	582
A.7	Pseudo-inversa	584
A.8	Decomposizione in valori singolari	585
	Riferimenti bibliografici	586
B	Meccanica dei corpi rigidi	587
B.1	Cinematica	587
B.2	Dinamica	589
B.3	Lavoro ed energia	592
B.4	Sistemi vincolati	593
	Riferimenti bibliografici	596
C	Controllo in retroazione	597
C.1	Controllo di sistemi lineari a un ingresso e una uscita	597
C.2	Controllo di sistemi meccanici non lineari	602
C.3	Metodo diretto di Lyapunov	605
	Riferimenti bibliografici	607
D	Geometria differenziale	609
D.1	Campi di vettori e parentesi di Lie	609
D.2	Controllabilità non lineare	613
	Riferimenti bibliografici	614
E	Algoritmi di ricerca su grafo	615
E.1	Complessità	615
E.2	Ricerca in ampiezza e in profondità	616
E.3	Algoritmo A^*	617
	Riferimenti bibliografici	619
	Bibliografia	619
	Indice analitico	637