

Indice

Indice	v
Prefazione	XXI
Per orientare il lettore	XXV
Simboli e abbreviazioni	XXVII
I Problematiche di base	1
I primi automatismi precursori dei robot	3
I progenitori dei robot attuali	4
1 Introduzione	5
1.1 Il termine <i>robot</i> .	5
1.2 Cosa fanno e cosa non fanno i robot	6
1.3 Cenni storici	6
1.4 La robotica in Italia e nel Mondo.	9
1.5 Diffusione della robotica	10
1.5.1 Robot industriali	10
1.5.2 Robot di servizio	13
1.6 Il robot industriale	13
1.6.1 Definizione funzionale	13
1.6.2 Robot Seriali	14
1.6.3 Robot paralleli	15
1.6.4 Robot ibridi seriali-paralleli	15
1.7 Robotica tradizionale e collaborativa	15
1.8 [N] Robot industriali: principali caratteristiche e terminologia	16
1.8.1 Introduzione	16
1.8.2 Robot e Robotica	17
1.8.3 Termini generali.	18
1.8.4 Struttura meccanica	19
1.8.5 Geometria e cinematica	23
1.8.6 Programmazione, comando e controllo	26
1.8.7 Prestazioni	29

1.9	Struttura di un sistema robotico	32
1.10	Un esempio: il robot SCARA	34
1.10.1	Struttura meccanica	34
1.10.2	Caratteristiche di un robot SCARA	37
1.10.3	Logica di controllo	37
1.11	[!] Programmazione e controllo negli spazi dei giunti e di lavoro . .	40
1.12	Etica della robotica, roboetica	42
2	Problematiche tipiche	43
2.1	Struttura e modello dei robot industriali	43
2.2	Analisi meccanica di un robot industriale	46
2.3	Analisi cinematica diretta e inversa	47
2.4	Cinetostatica.	49
2.5	Configurazioni singolari	50
2.6	Dualità cinetostatica.	51
2.7	Sistemi piani, Shöenflies e spaziali	51
2.7.1	Sistemi piani	51
2.7.2	Sistemi Shöenflies	51
2.7.3	Sistemi spaziali	52
2.8	Analisi dinamica diretta e inversa	52
2.8.1	Generalità	52
2.8.2	Approccio di Newton-Eulero	53
2.8.3	Dinamica lagrangiana	55
2.8.4	Proprietà dell'equazione dinamica	55
2.8.5	Analisi dinamica inversa	56
2.8.6	Analisi dinamica diretta.	56
2.9	Un esempio: il robot SCARA	57
2.9.1	Cinematica diretta	57
2.9.2	Cinematica inversa.	58
2.9.3	Cinetostatica	59
2.9.4	Configurazione singolare	60
2.9.5	Dualità cinetostatica	61
2.9.6	Dinamica diretta e inversa.	62
2.9.7	Addendum sulla cinematica inversa del robot SCARA . .	64
2.10	Robot SCARA a 3 gradi di libertà	65
2.11	Robot polare.	65
2.11.1	Descrizione	65
2.11.2	Cinematica diretta e inversa	66
2.11.3	Dinamica	68
2.12	Robot cilindrico	69
2.13	Ellissi di manipolabilità per l'analisi delle prestazioni	69
2.13.1	Prestazioni dei manipolatori in velocità e in forza . . .	70
2.13.2	Ellissi di manipolabilità in velocità e in forza	72
2.13.3	Discussione.	74

2.13.4	Ellissi e para-ellissi d'inerzia (di massa)	74
2.13.5	Ellissi di rigidezza	76
2.13.6	Forza, Velocità massima in una direzione	77
2.13.7	Approfondimenti, indici cinetostatici, isotropia.	78
2.13.8	Ellissi di massa, elasticità: esempi applicativi	78
2.14	Biella dinamicamente equivalente.	82
2.15	Robot antropomorfo.	83
2.15.1	Descrizione.	83
2.15.2	Cinematica diretta e inversa	84
2.15.3	Dinamica	85
2.16	Robot sferico.	85
2.16.1	Descrizione.	85
2.16.2	Cinematica diretta e inversa	86
2.17	Robot articolato 3GdL.	86
2.17.1	Descrizione.	87
2.17.2	Cinematica diretta e inversa	87
2.18	Robot antropomorfo modificato	88
2.19	Robot 3R	88
2.20	[!] Metodologia di risoluzione della cinematica inversa.	92
2.21	[!] Identificazione delle configurazioni singolari	93
2.22	Determinazione dello spazio di lavoro	94
2.23	Trasmissioni	95
2.24	Considerazioni sulla complessità delle equazioni	97
2.25	Robot a cinematica chiusa (paralleli)	98
2.26	Robot ridondanti	99

II Cinematica e dinamica di robot seriali e paralleli 101

3 Rappresentazione matriciale di vettori, coordinate angolari 103

3.1	[!] Matrici di rotazione e rappresentazioni matriciali di vettori . .	103
3.1.1	[!] Rappresentazione matriciale di vettori	103
3.1.2	Ulteriore rappresentazione matriciale di vettori	105
3.1.3	[E] Rotazioni elementari, matrice R	107
3.1.4	[A] Proprietà delle matrici di rotazione.	107
3.1.5	[D] Dimostrazioni	108
3.2	Successive rotazioni (Combinazione di matrici di rotazione) . . .	109
3.3	Orientamento di corpi	110
3.3.1	[!] Coordinate angolari, non integrabilità della velocità angolare.	110
3.3.2	Angoli di Eulero.	111
3.3.3	[A] Sistemi di angoli cardanici ed euleriani	113
3.3.4	[A] Asse di rotazione finita (asse e angolo di Eulero) . . .	113
3.3.5	[A] Parametri di Eulero (quaternioni unitari)	113



3.3.6	[A] Parametri di Rodrigues-Hamilton	114
3.3.7	Breve confronto	114
3.4	[/] Normalizzazione delle matrici di rotazione	115
4	Posizioni e spostamenti	117
4.1	Posizione di un punto: coordinate omogenee	117
4.2	Orientamento dei corpi.	118
4.3	Posa di un corpo	119
4.4	[!] Trasformazioni omogenee e matrici di posizione	119
4.4.1	[!] Matrici di posizione	119
4.4.2	[E] Esempio (matrice di posizione)	120
4.4.3	Trasformazione inversa	121
4.4.4	Osservazione sulla costruzione della matrice di posizione	122
4.4.5	Applicazioni ai meccanismi e ai robot	123
4.4.6	[E] Esempio di calcolo e inversione di una matrice di posizione	123
4.5	Cambi di riferimento multipli	123
4.6	[/] Grafo delle trasformazioni	124
4.7	Rototraslazioni elicoidali	125
4.7.1	Generalità	125
4.7.2	Rototraslazioni attorno ad assi coordinati.	128
4.7.3	[E] Esempio di costruzione della matrice Q	128
4.7.4	Ulteriore significato di $Q_{(i)}$	129
4.7.5	Rototraslazione attorno a un asse generico	130
4.7.6	Successive rototraslazioni	132
4.7.7	[E] Esempi	134
4.7.8	Rototraslazioni infinitesime	140
4.7.9	Spostamenti finiti e infinitesimi.	142
4.7.10	Successivi spostamenti finiti e infinitesimi.	143
4.7.11	Cambi di riferimento delle matrici L	144
4.7.12	[E] Esempio di calcolo della matrice L rispetto a diversi riferimenti	144
4.7.13	Matrici L in caso di accoppiamenti semplici	146
4.7.14	Estrazione dell'asse elicoidale dalla matrice L	147
4.7.15	Derivata delle matrici di posizione.	147
4.8	Piani e rette	148
5	Velocità e accelerazioni	149
5.1	Velocità e accelerazioni di un punto.	149
5.2	[!] Matrice di velocità di un corpo	149
5.3	[!] Matrice di accelerazione di un corpo	152
5.4	Derivate della matrice di posizione e legame con le matrici W e H	153
5.5	Relazioni notevoli	155
5.6	[E] Esempio	155



5.7	[!] Matrici di posizione, vel. e acc. per accoppiamenti semplici . . .	158
5.8	Cinematica relativa	160
5.8.1	Generalità	160
5.8.2	[!] Composizione delle velocità (teorema di Rivals) . . .	160
5.8.3	[!] Composizione delle accelerazioni (teorema di Coriolis). . .	162
5.9	Moti relativi: relazioni notevoli e tabella riassuntiva	162
5.10	[/] Analogie tra velocità e spostamenti infinitesimi	163
5.11	[A] Ulteriori legami tra matrici W , L , M e Q , formula esponenziale . . .	165

6 Analisi cinematica dei robot seriali 167

6.1	Scrittura delle equazioni: il metodo di Denavit e Hartenberg . . .	167
6.1.1	Generalità	167
6.1.2	Posizionamento “intelligente” delle terne	169
6.1.3	Le convenzioni di Denavit e Hartenberg (D&H)	170
6.1.4	[E] Il Robot Stanford Arm.	173
6.2	[N] Robot industriali: sistemi di coordinate e movimenti	175
6.2.1	Scopo e campo di applicazione	175
6.2.2	Terne e movimenti	176
6.3	Derivata della posizione della pinza rispetto alle coordinate ai giunti	178
6.4	Spostamenti della mano per movimenti infinitesimi ai giunti . . .	178
6.5	Problema cinematico diretto e inverso	179
6.5.1	Generalità	179
6.5.2	[/] Scelta delle coordinate della mano	181
6.5.3	Problema diretto: posizione, velocità e accelerazione . . .	182
6.5.4	Problema inverso: posizione, velocità e accelerazione . . .	183
6.6	[E] Esempi di soluzione del problema cinematico diretto e inverso . . .	183
6.6.1	Esempio 1: robot SCARA	183
6.6.2	Esempio 2: robot RRP	186
6.6.3	Esempio 3: robot sferico (RRP)	188
6.6.4	Esempio 4: robot antropomorfo <i>elbow arm</i>	191
6.7	Semplificazione della soluzione analitica del problema cinematico inverso (posizione)	196
6.7.1	Metodo del grafo di Paul	196
6.7.2	Metodo della scissione della catena cinematica	197
6.7.3	[E] Esempio applicativo dei metodi di Paul e della scissione della catena cinematica	198
6.7.4	Metodo dei vincoli equivalenti	199
6.7.5	Cinematica inversa di robot con polso sferico	200
6.8	Scrittura delle equazioni cinematiche: alcune varianti.	202
6.8.1	Metodo di Denavit & Hartenberg (D&H)	202
6.8.2	Metodo della doppia terna.	203
6.8.3	Metodo di Gupta	205
6.8.4	Equivalenza tra metodi	206

6.9	Soluzione numerica del problema cinematico inverso	206
6.9.1	Metodo di Newton-Raphson: generalità	206
6.9.2	Metodo di Newton-Raphson: applicazione ai robot	208
6.9.3	[E] Un esempio: il robot SCARA	210
6.9.4	Algoritmo di Newton-Raphson modificato: considerazioni	211
6.9.5	Esempi	213
6.9.6	Alcune considerazioni sul calcolo dello jacobiano	216
6.9.7	Scelta delle coordinate S del dispositivo d'estremità.	217
6.10	Cinematica inversa: metodo ibrido numerico-analitico	219
6.11	Problema inverso: velocità e accelerazioni	220
6.11.1	Introduzione	220
6.11.2	Calcolo delle velocità	221
6.11.3	Calcolo delle accelerazioni	222
6.12	[E] Esempio applicativo	222
6.12.1	Analisi delle velocità (<i>cinematica diretta</i>)	223
6.12.2	Analisi delle velocità (<i>cinematica inversa</i>)	225
6.12.3	Analisi delle accelerazioni (<i>cinematica diretta</i>)	227
6.12.4	Analisi delle accelerazioni (<i>cinematica inversa</i>)	229
6.13	Problema cinematico inverso per robot ridondanti o con GdL insufficienti 231	
6.14	Sistemi con “loop” (cinematica “parallela” o “chiusa”)	232
6.14.1	Generalità	232
6.14.2	Sistemi con più “loop”	233
6.14.3	[E] Esempio applicativo	233
6.15	Discussione finale	237
7	Dinamica dei robot seriali e di sistemi di corpi rigidi	239
7.1	Matrici delle azioni, d'inerzia e della quantità di moto	239
7.1.1	Matrice delle azioni (forze e coppie) Φ	239
7.1.2	Matrice della quantità di moto Γ	239
7.1.3	Pseudo-Tensore d'inerzia J	240
7.2	Cambi di riferimento delle matrici Φ , Γ e J	241
7.3	Relazioni tra grandezze cinematiche e dinamiche.	241
7.3.1	Accelerazioni e azioni di inerzia.	241
7.3.2	Quantità di moto e velocità di un corpo rigido	242
7.3.3	Energia cinetica di un corpo rigido	242
7.3.4	Energia potenziale	243
7.3.5	Forza peso	243
7.3.6	Potenza delle forze di inerzia	243
7.3.7	L'operatore <i>Skew</i>	243
7.3.8	Potenza di un sistema di forze	244
7.3.9	Lavoro infinitesimo (o virtuale)	244
7.4	Momento di inerzia di un corpo in movimento	244

7.5	[A] [D] Approfondimenti e dimostrazioni	245
7.5.1	Matrice delle azioni	245
7.5.2	Matrice della quantità di moto	247
7.5.3	Pseudo-tensore di inerzia	248
7.5.4	Dimostrazione della relazione $\Phi = HJ - JH^T$	248
7.5.5	Dimostrazione della relazione $\Gamma = WJ - JW^T$	249
7.5.6	Conservazione della quantità di moto	249
7.6	[E] Esempi numerici	250
7.6.1	Matrice Φ : esempio numerico	250
7.6.2	Matrice Γ : esempio numerico.	251
7.6.3	Matrice J : esempi numerici	251
7.7	Dinamica dei robot seriali	255
7.7.1	Introduzione e generalità	255
7.7.2	Problema dinamico inverso	256
7.7.3	Problema dinamico diretto	257
7.8	Dinamica lagrangiana	262
7.9	Sistematizzazione degli algoritmi, libreria <i>SPACE_LIB</i>	262
8	I robot ad architettura cinematica parallela (PKM)	267
8.1	Cosa è un robot a struttura parallela (PKM)	267
8.2	Cenni storici	269
8.3	Giunti attivi (o attuati) e giunti passivi (non attuati).	269
8.4	Classificazione	270
8.5	Confronto tra PKM e manipolatori seriali	271
8.5.1	Vantaggi delle PKM	271
8.5.2	Svantaggi delle PKM	272
8.6	Gradi di libertà.	273
8.7	Volume di lavoro	274
8.8	Problema cinematico diretto e inverso	274
8.9	Singularità	275
8.10	Analisi cinetostatica	277
8.11	Rigidezza	278
8.12	Indici di prestazione cinetostatica	279
8.13	[E] Sistema piano a un grado di libertà	281
8.14	[E] Pentaltero Manipolatore parallelo a 2 gradi di libertà	282
8.14.1	L'arco a 3 cerniere	283
8.14.2	Pentaltero classico	285
8.14.3	Pentaltero con azionamenti lineari	287
8.14.4	Spazio di lavoro	288
8.15	[E] PKM piana a 3 gradi di libertà	289
8.15.1	Generalità	289
8.15.2	Cinematica diretta e inversa	291
8.15.3	Configurazioni singolari	291
8.15.4	Jacobiano	291

8.16	[E] Esapode (piattaforma di Gough-Stewart)	292
8.16.1	Determinazione dei gradi di libertà dell'end-effector . . .	293
8.16.2	Analisi cinetostatica (metodo della chiusura vettoriale) .	294
8.16.3	Analisi cinematica (metodo matriciale)	296
8.16.4	Configurazioni singolari	297
8.17	Manipolatori tipo Delta	299

III Pianificazione, controllo e programmazione del movimento 301

9	Progetto e pianificazione del movimento, leggi di moto	303
9.1	Introduzione	303
9.2	Metodologie tipiche di movimentazione dei manipolatori	305
9.3	Considerazioni generali sulle leggi di moto a un grado di libertà .	306
9.3.1	Generalità	306
9.3.2	Criteri di scelta elementari: minimizzazione della velocità, della coppia e della potenza massima, leggi elementari . . .	307
9.3.3	Effetto dell'elasticità	312
9.4	Scalatura delle leggi di moto e suoi effetti sulle azioni d'inerzia . .	315
9.5	Sistema a 1 grado di libertà: tempo minimo di azionamento . . .	316
9.6	Criteri di movimentazione per robot a più gradi di libertà	319
9.7	Movimenti punto-punto in traiettoria libera	319
9.8	Movimenti punto-punto con punti intermedi	322
9.8.1	Generalità	322
9.8.2	Metodo con tratti di Rette e Parabole	323
9.8.3	Metodo delle spline cubiche	326
9.8.4	Verifica dei vincoli di velocità e accelerazione, spaziatura tra i nodi	330
9.8.5	Confronto tra rette-parabole e spline.	331
9.9	Movimento in traiettoria predefinita	333
9.9.1	Concetti di base	334
9.9.2	Traiettoria rettilinea	335
9.9.3	Traiettoria circolare	336
9.9.4	Traiettoria elicoidale	338
9.9.5	Traiettorie circolari ed elicoidali con giacitura generale .	339
9.9.6	Percorrenza di una traiettoria, algoritmo Look-Ahead . .	339
9.9.7	Variazione di orientamento (traiettorie angolari)	344
9.9.8	[E] Esempio robot SCARA	345
9.9.9	Calcolo dell'errore commesso approssimando una traietto- ria rettilinea con una circolare	347
9.10	Legge di moto a sette tratti con accelerazione lineare	351
9.10.1	Generalità	351
9.10.2	Calcolo dei coefficienti	352

9.10.3	Calcolo della legge	353
9.11	Raccordo polinomiale	353
9.12	Raccordi in traiettoria con punti angolosi	353
9.13	Ottimizzazione della traiettoria	356
9.13.1	Esempio con utilizzo di polinomi	357
9.13.2	Esempio con utilizzo di funzioni armoniche	358
10	Controllo dei robot	359
10.1	Schema di controllo di un robot	359
10.2	Funzioni di trasferimento dei motori	362
10.2.1	Motori in corrente continua (c.c.)	363
10.2.2	Motori in c.c.: comando in tensione o corrente (velocità o coppia)	367
10.2.3	Motori sincroni a commutazione elettronica (brushless)	369
10.3	Azionamenti industriali	370
10.3.1	Controllo retroazionato di velocità	370
10.3.2	Controllo retroazionato di posizione	373
10.3.3	Regolatori industriali PID	381
10.3.4	Scelta del regolatore e del valore dei suoi parametri	383
10.4	Fenomeni presenti nei robot reali	383
10.4.1	Effetto dei momenti di inerzia costanti e/o variabili	383
10.4.2	Effetto della forza peso	385
10.4.3	Effetto dell'attrito radente	385
10.4.4	Effetto dell'attrito statico	385
10.4.5	Effetto delle elasticità	386
10.4.6	Criteri di buon progetto per i regolatori di posizione	390
10.5	Controllo dei robot a più gradi di libertà	390
10.5.1	Controllo centralizzato e decentralizzato	390
10.5.2	Coordinazione tra le tarature dei giunti	399
10.5.3	Effetti dinamici mutui tra link	400
10.6	Controllo nello spazio di lavoro	402
10.7	Controllo di forza	403
10.7.1	Campi applicativi	403
10.7.2	Caratteristiche principali	404
10.7.3	Controllore di forza (cenni)	406
10.7.4	Controllore di impedenza (schema concettuale)	407
10.7.5	Misure di forza o coppia	408
10.7.6	Controllo ibrido (cenni)	408
10.7.7	Controlli di forza passivi (cenni)	411
10.7.8	Teleoperatori con retroazione di forza e interfacce aptiche	412
11	Programmazione dei robot	413
11.1	Introduzione	413
11.2	Programmazione di movimento o di compito	414



11.3	Metodi di programmazione	414
11.4	Principali termini di confronto tra linguaggi	419
11.5	Sistemi grafici interattivi	421
11.6	Ottimizzazione e verifica dei programmi	422
11.7	[E] Programmazione di un robot con controllo di posizione	423
11.8	[E] Programmazione di un robot con controllo ibrido	427
11.9	[E] Programmazione del robot Icomatic SCARA03	428

IV Componenti meccanici, attuatori e sensori 433

12 Principali componenti meccanici 435

12.1	Generazione dei movimenti rotatori e di traslazione	435
12.2	Perdite nei riduttori	438
12.3	Cenni sulle trasmissioni remote	440
12.3.1	Meccanismi articolati	440
12.3.2	Cinghie, catene e cavi	441
12.3.3	Trasmissioni remote con alberi coassiali	444
12.3.4	Polsi sferici	445
12.3.5	Giunto cilindrico attuato	446
12.3.6	Effetto dell'irregolarità introdotta da alcune trasmissioni	447
12.3.7	[E] Esempio: il robot DOGHI	450
12.4	Generalità sui riduttori di velocità	451
12.4.1	Principali requisiti	451
12.4.2	Riduttori ordinari	452
12.4.3	Riduttori epicicloidali	452
12.4.4	Riduttori tipo Harmonic-Drive (HD)	454
12.4.5	Caratteristiche dell'Harmonic Drive	456
12.4.6	Irregolarità dell'HD	457
12.4.7	Un modello dinamico dell'Harmonic Drive	457
12.4.8	Dati tecnici dell'HARMONIC DRIVE	458
12.4.9	Note sulla scelta degli HD	459
12.4.10	Perdite e rendimento	460
12.4.11	Riduttori articolati "RV-A"	461
12.4.12	Note sulla scelta dei riduttori "RV-A"	463
12.4.13	Breve confronto tra i vari tipi di riduttori	463
12.5	I motori utilizzati in robotica	464
12.5.1	Motore in corrente continua (c.c.)	464
12.5.2	Motori <i>brushless</i>	466
12.5.3	Motori passo-passo (<i>stepper</i>)	468
12.5.4	Confronto tra motori in corrente continua e brushless	468
12.5.5	Caratteristiche dei convertitori per motori c.c. a magneti permanenti	470
12.5.6	Caratteristiche dei convertitori per motori brushless	471



12.5.7	Scelta del motore e del rapporto di trasmissione	472
12.6	Accoppiamento motore-trasmissione, effetti dell'inerzia	477
12.6.1	Introduzione	477
12.6.2	[E] Esempio: robot SCARA	479
12.7	Dispositivi cedevoli per controllo passivo di forza	481
12.8	[N] Interfacce meccaniche circolari	483
12.8.1	Introduzione	483
12.8.2	Forme e dimensioni	484
12.8.3	Identificazione e marchiatura	484
12.9	Dispositivi vari	484
12.10	Equilibramento statico	486
13	Sensori e trasduttori	491
13.1	Introduzione	491
13.2	Resolver	493
13.3	Encoder	493
13.4	Righe ottiche	496
13.5	Dinamo tachimetrica	497
13.6	Sensori a <i>effetto Hall</i>	497
13.7	Inductosyn	498
13.8	Trasduttori di forza	499
13.9	Accelerometri	501
13.10	Potenzimetri	504
13.11	LVDT	505
13.12	Triangolazione, trilaterazione e interferometria laser	506
13.12.1	Triangolazione	506
13.12.2	Sistemi laser a inseguimento	506
13.12.3	Trilaterazione	508
13.12.4	Interferometria	508
13.13	Sistemi di visione	510
13.13.1	Generalità	510
13.13.2	Esempio elementare d'elaborazione d'immagini per deter- minare la forma di oggetti	511
13.13.3	Estrazione dei contorni di oggetti	511
13.13.4	Riconoscimento di oggetti	513
13.13.5	Osservazioni	514
13.13.6	Ricostruzione spaziale delle coordinate	515
13.14	Telecamere 3D a tempo di volo	517
13.15	[I] Conversione analogico-digitale e campionamento	518
13.16	[I] Considerazioni generali su alcune elaborazioni dei segnali . . .	521
V	Prestazioni, normativa, sicurezza	523
14	Prestazioni statiche e dinamiche, calibrazione	525

14.1	Errori geometrici e calibrazione cinematica	525
14.1.1	Introduzione	525
14.1.2	[E] Robot SCARA semplificato	528
14.1.3	Sorgenti di errore	529
14.1.4	Accuratezza e ripetibilità	530
14.1.5	Processo di calibrazione	531
14.1.6	Calibrazione parametrica e non parametrica	532
14.1.7	Stima degli errori strutturali	533
14.1.8	Compensazione <i>off-line</i> e <i>on-line</i>	534
14.1.9	Compensazione degli errori nello spazio dei giunti	534
14.1.10	Compensazione degli errori nello spazio di lavoro	536
14.1.11	Effettuazione delle misure e stima degli errori strutturali, osservabilità	536
14.1.12	Scrittura delle equazioni	539
14.1.13	Scelta dei parametri: robot a n gradi di libertà	541
14.1.14	Scelta dei parametri: variazione dei parametri di Denavit e Hartenberg	542
14.1.15	Scelta dei parametri: modello completo, minimo, propor- zionale	544
14.1.16	[E] Esempio 1: robot SCARA (modello semplificato)	545
14.1.17	[!] [E] Esempio 2: robot SCARA (modello completo)	549
14.1.18	Misura degli errori di posa	549
14.1.19	Calibrazione di manipolatori paralleli (PKM)	552
14.2	Il comportamento dinamico di un robot	553
14.2.1	Introduzione	553
14.2.2	Modello rigido	553
14.2.3	Modello della trasmissione	553
14.2.4	Modello dinamico con elasticità a parametri concentrati	554
14.2.5	Stima dei parametri	556
14.2.6	Verifica sperimentale del modello elastico	556
14.2.7	Modello rigido: stima dei parametri dinamici (calibrazio- ne dinamica)	557
14.3	Controllo ibrido forza-velocità per il tracciamento di contorni	562
15	[N] Normativa e sicurezza	567
15.1	Introduzione	567
15.2	Certificazione delle prestazioni	568
15.3	La normativa tecnica	569
15.4	Norme tecniche per la robotica	570
15.5	Norme sulla compatibilità elettromagnetica (EMC)	570
15.6	Altre norme	573
15.7	La sicurezza	573
15.7.1	Fattori fondamentali	573
15.7.2	Pericoli e rischi	574

15.7.3	Analisi dei rischi, rischio nullo e accettabile	574
15.7.4	La macchina è a norma, la posso usare tranquillamente? .	575
15.7.5	La sicurezza è un costo?	575
15.7.6	Ridondanza: la regola del formaggio svizzero	575
15.8	La normativa sulla sicurezza	575
15.8.1	Le leggi della robotica di Isaac Asimov	575
15.8.2	Norme legislative e tecniche	576
15.8.3	Il “nuovo approccio” e la presunzione di conformità . . .	577
15.8.4	Certificazione o autocertificazione?	578
15.8.5	Le norme tecniche armonizzate	580
15.9	Come ottenere la sicurezza	581
15.10	La marcatura CE	581
15.11	Il “Regolamento Macchine” e la “Direttiva Macchine”	582
15.11.1	Scopo del “Regolamento Macchine”	582
15.11.2	Il campo di applicazione e definizioni	582
15.11.3	Esclusioni	583
15.11.4	Vincoli e deroghe	584
15.11.5	Obblighi del fabbricante, suo mandatario o importatore .	584
15.11.6	Presunzione di conformità	585
15.11.7	Norme sull’installazione e l’uso	586
15.11.8	Penalità	586
15.11.9	Requisiti essenziali di sicurezza e salute	586
15.11.10	Analisi dei rischi.	592
15.11.11	La marcatura CE	592
15.11.12	Il manuale delle istruzioni	593
15.11.13	Il fascicolo tecnico	594
15.11.14	Documentazione tecnica pertinente	595
15.11.15	Attestazione di conformità, dichiarazione d’incorporazio- ne	595
15.11.16	La clausola di salvaguardia	596
15.11.17	Le novità del Regolamento Macchine	596
15.12	Le norme armonizzate EN ISO 10218 “Requisiti di sicurezza per robot industriali”	599
15.12.1	Considerazioni generali	600
15.12.2	Spazio protetto, massimo, ristretto e collaborativo . . .	602
15.12.3	Interventi nello spazio protetto	602
15.12.4	Unità portatile di programmazione	603
15.12.5	Modalità operative.	604
15.12.6	Funzionamento automatico	605
15.12.7	Controllo remoto	605
15.12.8	Dispositivo d’estremità, blocchi sui motori	605
15.12.9	Ripari fissi	606
15.12.10	Ripari mobili	606
15.12.11	Dispositivi rilevatori di presenza	606

15.12.12 Programmazione	607
15.12.13 Manutenzione.	607
15.12.14 Istruzione	608
15.12.15 Identificazione dei malfunzionamenti.	608
15.12.16 Ulteriori precauzioni	608
15.12.17 Progetto di una cella di lavoro	608
15.12.18 Celle collaborative	608
15.13 Applicazioni collaborative: ISO/TS 15066:2016	611
15.14 Classe dei robot	612
15.15 Cybersicurezza	613
15.16 Dispositivi di sicurezza.	613
15.17 I sistemi di controllo.	614
16 [N] Norme per la misura delle prestazioni dei robot	617
16.1 [!] Introduzione	617
16.2 [!] Criteri generali per la conduzione delle prove	620
16.3 Scelta dei punti di misura.	621
16.4 Accuratezza e ripetibilità per posizionamento unidirezionale	622
16.5 Variazione di accuratezza per posizionamento multidirezionale	624
16.6 Errore di distanza.	624
16.7 Misura del tempo di stabilizzazione.	625
16.8 Misura di sovraelongazione di posizionamento.	625
16.9 Misura di deriva temporale di posa	625
16.10 Misure di ripetibilità e accuratezza sulla traiettoria	627
16.11 Sovraelongazione e arrotondamento in percorsi con angoli	627
16.12 Misura delle caratteristiche di velocità.	627
16.13 Tempo di posizionamento.	629
16.14 Rigidezza statica	629
17 [N] Robot industriali: presentazione delle caratteristiche	631
17.1 Introduzione	631
17.2 Riferimenti e definizioni	631
17.3 Unità di misura	632
17.4 Caratteristiche	632
17.4.1 Applicazione	632
17.4.2 Alimentazione di potenza	632
17.4.3 Struttura meccanica	633
17.4.4 Spazio di lavoro	633
17.4.5 Sistemi di coordinate	634
17.4.6 Dimensioni esterne e massa	634
17.4.7 Superficie di montaggio della base.	634
17.4.8 Interfaccia meccanica.	634
17.4.9 Controllo (comando)	635
17.4.10 Metodi di programmazione	635

17.4.11 Ambiente	635
17.4.12 Carico.	635
17.4.13 Velocità	636
17.4.14 Risoluzione.	636
17.4.15 Prestazioni	637
17.4.16 Sicurezza	638
18 Robotica e automazione: questioni etiche	639
18.1 Introduzione	639
18.2 Roboetica: definizione	641
18.3 Intelligenza artificiale e test di Turing	643
18.4 Roboetica	645
18.5 Codice etico dei robot	647
18.6 Verso un regolamento dell'UE	649
18.7 Sogni esauditi? Benedizione o maledizione?.	651
VI Appendici	653
A Convenzioni angolari	655
A.1 Sistemi di angoli cardanici ed euleriani	655
A.2 Convenzioni cardaniche	658
A.3 Convenzioni Euleriane	659
A.4 Convenzioni Cardaniche ed Euleriane: velocità e accelerazioni	660
A.4.1 Velocità	660
A.4.2 Accelerazioni	661
A.5 Matrice di rotazione	662
A.6 Asse di rotazione finita (Asse e angolo di Eulero)	663
A.7 Angoli di Eulero	664
A.8 Angoli nautici	665
A.9 Angoli di Cardano (di Tait-Bryan).	666
A.10 Coordinate tubolari	667
A.11 Parametri di Rodrigues-Hamilton	668
A.12 Parametri di Eulero (Quaternioni unitari)	669
A.13 Angoli proiettivi	670
B Relazioni matematiche utili	671
B.1 Relazioni trigonometriche.	671
B.1.1 Relazioni notevoli	671
B.1.2 Sistemi di equazioni trigonometriche.	672
B.2 Matrici e vettori	673
B.2.1 Derivate di matrici e vettori	673
B.2.2 Ulteriori definizioni riguardanti matrici.	675
B.3 Le funzioni segno e atan2.	676
B.3.1 La funzione segno $\text{sgn}(x)$	676

B.3.2	La funzione $\text{atan2}(y, x)$	677
B.4	Inversa di matrice a blocchi	680
C	Matrice pseudo inversa	681
C.1	Generalità.	681
C.2	Particolari pseudo-inverse e principali proprietà	684
C.3	Algoritmo di calcolo della pseudo inversa	685
D	L'algoritmo di Newton-Raphson	687
E	Ellissi: proprietà e rappresentazioni	691
E.1	Rappresentazioni e proprietà delle ellissi	691
F	Richiami su funzioni di trasferimento e teoria del controllo	695
F.1	Regolazione di un sistema	695
F.2	Funzioni di trasferimento e risposta in frequenza.	697
F.3	Banda passante.	699
F.4	Sistemi del primo ordine	700
F.4.1	Modello	700
F.4.2	Risposta al gradino e alla rampa	701
F.5	Sistemi del secondo ordine	702
F.5.1	Sistemi senza zeri	702
F.5.2	Risposta al gradino	703
F.5.3	Sistemi con uno zero	704
F.6	Stabilità di un sistema lineare	704
F.7	Schemi a blocchi	705
F.8	Sistemi con retroazione.	706
F.9	Stabilità dei sistemi retroazionati.	707
	Bibliografia	709
	Indice analitico	715
	Indice analitico	715