

Indice

Indice	v
Prefazione	xxi
Per orientare il lettore	xxiii
Simboli e abbreviazioni	xxiv
I Problematiche di base	1
1 Introduzione	3
1.1 Il termine robot	3
1.2 Cosa fanno e cosa non fanno i robot industriali	4
1.3 Cenni storici	4
1.4 La robotica in Italia e nel Mondo.	7
1.5 Diffusione della robotica	7
1.5.1 Robot industriali	7
1.5.2 Robot di servizio	10
1.6 Il robot industriale	11
1.6.1 Definizione funzionale	11
1.6.2 Robot Seriali	11
1.6.3 Robot paralleli	12
1.6.4 Robot ibridi seriali-paralleli	13
1.7 Robotica tradizionale e collaborativa	13
1.8 [N] Robot industriali: principali caratteristiche e terminologia . .	14
1.8.1 Introduzione	14
1.8.2 Robot e Robotica	14
1.8.3 Termini generali.	15
1.8.4 Struttura meccanica	17
1.8.5 Geometria e cinematica	20
1.8.6 Programmazione, comando e controllo	24
1.8.7 Prestazioni	27
1.9 Struttura di un sistema robotico	30
1.10 Un esempio: il robot SCARA	32
1.10.1 Struttura meccanica	32

1.10.2	Caratteristiche di un robot SCARA	34
1.10.3	Logica di controllo	35
1.11	[!] Programmazione e controllo negli spazi dei giunti e di lavoro.	38
2	Problematiche tipiche	41
2.1	Struttura e modello dei robot industriali	41
2.2	Analisi meccanica di un robot industriale	44
2.3	Analisi cinematica diretta e inversa	46
2.4	Cinetostatica.	48
2.5	Configurazioni singolari	49
2.6	Dualità cinetostatica.	49
2.7	Sistemi piani, Shöenflies e spaziali	50
2.7.1	Sistemi piani	50
2.7.2	Sistemi Shöenflies	50
2.7.3	Sistemi spaziali	50
2.8	Analisi dinamica diretta e inversa	51
2.8.1	Generalità	51
2.8.2	Approccio di Newton-Eulero	51
2.8.3	Dinamica lagrangiana	54
2.8.4	Proprietà dell'equazione dinamica	54
2.8.5	Analisi dinamica inversa	54
2.8.6	Analisi dinamica diretta.	55
2.9	Un esempio: il robot SCARA	55
2.9.1	Cinematica diretta	56
2.9.2	Cinematica inversa.	57
2.9.3	Cinetostatica	58
2.9.4	Configurazione singolare	59
2.9.5	Dualità cinetostatica	59
2.9.6	Dinamica diretta e inversa.	60
2.9.7	Addendum sulla cinematica inversa del robot SCARA.	63
2.10	Robot SCARA a 3 gradi di libertà	63
2.11	Robot polare.	64
2.11.1	Descrizione.	64
2.11.2	Cinematica diretta e inversa	65
2.11.3	Dinamica	66
2.12	Robot cilindrico	67
2.13	Ellissi di manipolabilità per l'analisi delle prestazioni	68
2.13.1	Prestazioni dei manipolatori in velocità e in forza	68
2.13.2	Ellissi di manipolabilità in velocità e in forza	70
2.13.3	Discussione.	72
2.13.4	Ellissi d'inerzia (di massa).	73
2.13.5	Ellissi di rigidezza	74
2.13.6	Forza, Velocità massima in una direzione	75
2.13.7	Approfondimenti, indici cinetostatici, isotropia.	75

2.13.8	Ellissi di massa, elasticità: esempi applicativi	76
2.14	Biella dinamicamente equivalente.	79
2.15	Robot antropomorfo.	81
2.15.1	Descrizione.	81
2.15.2	Cinematica diretta e inversa	81
2.15.3	Dinamica	82
2.16	Robot sferico.	83
2.16.1	Descrizione.	83
2.16.2	Cinematica diretta e inversa	83
2.17	Robot articolato 3GDLgdl	84
2.17.1	Descrizione.	84
2.17.2	Cinematica diretta e inversa	85
2.18	Robot antropomorfo modificato	85
2.19	Robot 3R	86
2.20	[!] Metodologia di risoluzione della cinematica inversa.	89
2.21	[!] Identificazione delle configurazioni singolari	91
2.22	Determinazione dello spazio di lavoro	92
2.23	Trasmissioni	93
2.24	Considerazioni sulla complessità delle equazioni	96
2.25	Robot a cinematica chiusa (paralleli)	96
2.26	Robot ridondanti	98

II Cinematica e dinamica di robot seriali e paralleli 99

3 Rappresentazione matriciale di vettori, coordinate angolari 101

3.1	[!] Matrici di rotazione e rappresentazioni matriciali di vettori	101
3.1.1	[!] Rappresentazione matriciale di vettori	101
3.1.2	Ulteriore rappresentazione matriciale di vettori	103
3.1.3	[E] Rotazioni elementari, matrice R	105
3.1.4	[A] Proprietà delle matrici di rotazione.	105
3.1.5	[D] Dimostrazioni	106
3.2	Successive rotazioni (Combinazione di matrici di rotazione)	107
3.3	Orientamento di corpi	108
3.3.1	[!] Coordinate angolari, non integrabilità della velocità angolare.	108
3.3.2	Angoli di Eulero.	109
3.3.3	[A] Sistemi di angoli cardanici ed euleriani	111
3.3.4	[A] Asse di rotazione finita (asse e angolo di Eulero)	111
3.3.5	[A] Parametri di Eulero (quaternioni unitari)	111
3.3.6	[A] Parametri di Rodriguez-Hamilton	112
3.3.7	Breve confronto	112
3.4	[/] Normalizzazione delle matrici di rotazione	113

4 Posizioni e spostamenti 115

4.1	Posizione di un punto: coordinate omogenee	115
4.2	Orientamento dei corpi.	116
4.3	Posa di un corpo	117
4.4	[!] Trasformazioni omogenee e matrici di posizione	117
4.4.1	[!] Matrici di posizione	117
4.4.2	[E] Esempio (matrice di posizione)	118
4.4.3	Trasformazione inversa	119
4.4.4	Osservazione sulla costruzione della matrice di posizione .	120
4.4.5	Applicazioni ai meccanismi e ai robot	121
4.4.6	[E] Esempio di calcolo e inversione di una matrice di posizione	121
4.5	Cambi di riferimento multipli	122
4.6	[/] Grafo delle trasformazioni	122
4.7	Rototraslazioni elicoidali	123
4.7.1	Generalità	123
4.7.2	Rototraslazioni attorno ad assi coordinati.	126
4.7.3	[E] Esempio di costruzione della matrice Q	127
4.7.4	Ulteriore significato di $Q_{(i)}$	127
4.7.5	Rototraslazione attorno a un asse generico	128
4.7.6	Successive rototraslazioni	131
4.7.7	[E] Esempi	133
4.7.8	Rototraslazioni infinitesime	139
4.7.9	Spostamenti finiti e infinitesimi.	140
4.7.10	Successivi spostamenti finiti e infinitesimi.	141
4.7.11	Cambi di riferimento delle matrici L	143
4.7.12	[E] Esempio di calcolo della matrice L rispetto a diversi riferimenti	143
4.7.13	Matrici L in caso di accoppiamenti semplici	145
4.7.14	Estrazione dell'asse elicoidale dalla matrice L	146
4.7.15	Derivata delle matrici di posizione.	146
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	154
5.6	[E] Esempio	154
5.7	[!] Matrici di posizione, vel. e acc. per accoppiamenti semplici . .	157
5.8	Cinematica relativa	159
5.8.1	Generalità	159
5.8.2	[!] Composizione delle velocità (teorema di Rivals) . . .	159
5.8.3	[!] Composizione delle accelerazioni (teorema di Coriolis). 161	
5.9	Moti relativi: relazioni notevoli e tabella riassuntiva	161

5.10	[/] Analogie tra velocità e spostamenti infinitesimi	163
5.11	[A] Ulteriori legami tra matrici W , L , M e Q , formula esponenziale	164
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 “elbow arm”	191
6.7	Soluzione analitica del problema cinematico inverso (posizione)	195
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	198
6.7.5	Cinematica inversa di robot con polso sferico	200
6.8	Scrittura delle equazioni cinematiche: alcune varianti	201
6.8.1	Metodo di Denavit & Hartenberg (D&H)	201
6.8.2	Metodo della doppia terna	203
6.8.3	Metodo di Gupta	204
6.8.4	Equivalenza tra metodi	205
6.9	Soluzione numerica del problema cinematico inverso	207
6.9.1	Metodo di Newton-Raphson: generalità	207
6.9.2	Metodo di Newton-Raphson: applicazione ai robot	207
6.9.3	[E] Un esempio: il robot SCARA	209
6.9.4	Algoritmo di Newton-Raphson modificato: considerazioni	210
6.9.5	Esempi	212
6.9.6	Alcune considerazioni sul calcolo dello jacobiano	215

6.9.7	Scelta delle coordinate S del dispositivo d'estremità.	216
6.10	Cinematica inversa: metodo ibrido numerico-analitico	218
6.11	Problema inverso: velocità e accelerazioni	219
6.11.1	Introduzione	219
6.11.2	Calcolo delle velocità	220
6.11.3	Calcolo delle accelerazioni	221
6.12	[E] Esempio applicativo	221
6.12.1	Analisi delle velocità (<i>cinematica diretta</i>).	222
6.12.2	Analisi delle velocità (<i>cinematica inversa</i>)	224
6.12.3	Analisi delle accelerazioni (<i>cinematica diretta</i>).	226
6.12.4	Analisi delle accelerazioni (<i>cinematica inversa</i>).	228
6.13	Problema cinematico inverso per robot ridondanti o con G.d.L. insufficienti	230
6.14	Sistemi con "loop" (cinematica "parallela" o "chiusa")	231
6.14.1	Generalità	231
6.14.2	Sistemi con più "loop"	232
6.14.3	[E] Esempio applicativo	233
6.15	Discussione finale	236
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	268
8.3	Giunti attuati (o attivi) 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	276
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] Pentalatero Manipolatore parallelo a 2 gradi di libertà	282
8.14.1	L'arco a 3 cerniere	282
8.14.2	Pentalatero classico	284
8.14.3	Pentalatero 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
8.16	[E] Esapode (piattaforma di Stewart-Gough)	293
8.16.1	Determinazione dei gradi di libertà dell'end-effector.	293
8.16.2	Analisi cinetostatica (metodo della chiusura vettoriale)	293
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 in un piano coordinato	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 Coordinate di posizione e di orientamento	344
9.9.8 [E] Esempio robot SCARA	344
9.9.9 Calcolo dell'errore commesso approssimando una traiettoria rettilinea con una circolare	346
9.10 Legge di moto a sette tratti con accelerazione lineare	350
9.10.1 Generalità	350
9.10.2 Calcolo dei coefficienti	351
9.10.3 Calcolo della legge	352
9.11 Raccordo polinomiale	352
9.12 Raccordi in traiettoria con punti angolosi	352
9.13 Ottimizzazione della traiettoria	355
9.13.1 Esempio con utilizzo di polinomi	356
9.13.2 Esempio con utilizzo di funzioni armoniche	357
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	372
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	401
10.7	Controllo di forza	403
10.7.1	Campi applicativi	403
10.7.2	Caratteristiche principali	403
10.7.3	Controllore di forza (cenni)	405
10.7.4	Controllore di impedenza (schema concettuale)	406
10.7.5	Misure di forza o coppia.	407
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	411
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	418
11.5	Sistemi grafici interattivi	420
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	442
12.3.3 Trasmissioni remote con alberi coassiali	445
12.3.4 Polsi sferici	446
12.3.5 Giunto cilindrico attuato	446
12.3.6 Effetto dell'irregolarità introdotta da alcune trasmissioni .	448
12.3.7 [E] Esempio: il robot DOGHI	451
12.4 Generalità sui riduttori di velocità	451
12.4.1 Principali requisiti	451
12.4.2 Riduttori ordinari	453
12.4.3 Riduttori epicicloidali	453
12.4.4 Riduttori tipo Harmonic-Drive (HD).	455
12.4.5 Caratteristiche dell'Harmonic Drive	457
12.4.6 Irregolarità dell'HD	458
12.4.7 Un modello dinamico dell'Harmonic Drive	458
12.4.8 Dati tecnici dell'HARMONIC DRIVE	460
12.4.9 Note sulla scelta degli HD	460
12.4.10 Perdite e rendimento	462
12.4.11 Riduttori articolati "RV-A"	463
12.4.12 Note sulla scelta dei riduttori "RV-A"	465
12.4.13 Breve confronto tra i vari tipi di riduttori	465
12.5 I motori utilizzati in robotica	466
12.5.1 Motore in corrente continua (c.c.)	466
12.5.2 Motori <i>brushless</i>	468
12.5.3 Motori passo-passo (<i>stepper</i>)	470
12.5.4 Confronto tra motori in corrente continua e brushless . .	471
12.5.5 Caratteristiche dei convertitori per motori c.c. a magneti permanenti	472
12.5.6 Caratteristiche dei convertitori per motori brushless. . .	473
12.5.7 Scelta del motore e del rapporto di trasmissione	475
12.6 Effetti dell'inerzia nell'accoppiamento motore-trasmissione. . . .	479
12.6.1 Introduzione	479
12.6.2 [E] Esempio: robot SCARA	482
12.7 Dispositivo <i>RCC</i> (Remote Center of Compliance)	484
12.8 [N] Interfacce meccaniche circolari, forma A	486
12.8.1 Introduzione	486
12.8.2 Forme e dimensioni	486
12.8.3 Identificazione e marchiatura	488

12.9	Dispositivi vari	488
12.10	Equilibramento statico	489
13	Sensori e trasduttori	493
13.1	Introduzione	493
13.2	Resolver	495
13.3	Encoder.	495
13.4	Righe ottiche	498
13.5	Dinamo tachimetrica	498
13.6	Sensori a <i>effetto Hall</i>	499
13.7	Inductosyn	500
13.8	Trasduttori di forza	501
13.9	Accelerometri	504
13.10	Potenziometri	506
13.11	LVDT	507
13.12	Triangolazione, trilaterazione e interferometria laser	508
13.12.1	Triangolazione	508
13.12.2	Sistemi laser a inseguimento	508
13.12.3	Trilaterazione	510
13.12.4	Interferometria	510
13.13	Sistemi di visione	512
13.13.1	Generalità	512
13.13.2	Esempio elementare d'elaborazione d'immagini per deter- minare la forma di oggetti	513
13.13.3	Estrazione dei contorni di oggetti	513
13.13.4	Riconoscimento di oggetti	515
13.13.5	Osservazioni	516
13.13.6	Ricostruzione spaziale delle coordinate	518
13.14	Telecamere 3D a tempo di volo	519
13.15	[I] Conversione analogico-digitale e campionamento	520
13.16	[I] Considerazioni generali su alcune elaborazioni dei segnali	523
V	Prestazioni, normativa, sicurezza	525
14	Prestazioni statiche e dinamiche, calibrazione	527
14.1	Errori geometrici e calibrazione cinematica	527
14.1.1	Introduzione	527
14.1.2	[E] Robot SCARA semplificato	530
14.1.3	Sorgenti di errore	531
14.1.4	Accuratezza e ripetibilità	532
14.1.5	Processo di calibrazione.	533
14.1.6	Calibrazione parametrica e non parametrica.	534
14.1.7	Stima degli errori strutturali	535
14.1.8	Compensazione <i>off-line</i> e <i>on-line</i>	536

14.1.9	Compensazione degli errori nello spazio dei giunti . . .	537
14.1.10	Compensazione degli errori nello spazio di lavoro . . .	538
14.1.11	Effettuazione delle misure e stima degli errori strutturali, osservabilità	538
14.1.12	Scrittura delle equazioni	541
14.1.13	Scelta dei parametri: robot a n gradi di libertà	543
14.1.14	Scelta dei parametri: variazione dei parametri di Denavit e Hartenberg	544
14.1.15	Scelta dei parametri: modello completo, minimo, propor- zionale	546
14.1.16	[E] Esempio 1: robot SCARA (modello semplificato) . .	547
14.1.17	[!] [E] Esempio 2: robot SCARA (modello completo) . .	551
14.1.18	Misura degli errori di posa.	551
14.1.19	Calibrazione di manipolatori paralleli (PKM)	554
14.2	Il comportamento dinamico di un robot	554
14.2.1	Introduzione	554
14.2.2	Modello rigido	555
14.2.3	Modello della trasmissione.	555
14.2.4	Modello dinamico con elasticità a parametri concentrati .	556
14.2.5	Stima dei parametri	558
14.2.6	Verifica sperimentale del modello elastico	558
14.2.7	Modello rigido: stima dei parametri dinamici (calibrazio- ne dinamica)	559
14.3	Controllo ibrido forza-velocità per il tracciamento di contorni . .	563
15 [N]	Normativa e sicurezza	569
15.1	Introduzione	569
15.2	Certificazione delle prestazioni.	570
15.3	La normativa tecnica	571
15.4	Norme tecniche per la robotica	572
15.5	Norme sulla compatibilità elettromagnetica (EMC)	574
15.6	Altre norme	575
15.7	La sicurezza	576
15.7.1	Fattori fondamentali	576
15.7.2	Pericoli e rischi	576
15.7.3	Analisi dei rischi, rischio nullo e accettabile	576
15.7.4	La macchina è a norma, la posso usare?	577
15.7.5	La sicurezza è un costo?.	577
15.8	La normativa	577
15.8.1	Le leggi della robotica di Isaac Asimov	577
15.8.2	Norme legislative e tecniche	578
15.8.3	Il “nuovo approccio”	578
15.8.4	Certificazione o autocertificazione?	579
15.8.5	Le norme tecniche armonizzate	581

15.9	Come ottenere la sicurezza	582
15.10	La marcatura CE	582
15.11	La “direttiva macchine” (2006/42/EC).	583
15.11.1	Scopo della “direttiva macchine”	583
15.11.2	Il campo di applicazione e definizioni	583
15.11.3	Esclusioni	584
15.11.4	Vincoli e deroghe	585
15.11.5	Obblighi del fabbricante, suo mandatario o importatore	585
15.11.6	Presunzione di conformità	586
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.	593
15.11.11	La marcatura CE	594
15.11.12	Il manuale delle istruzioni	594
15.11.13	Il fascicolo tecnico	595
15.11.14	Documentazione tecnica pertinente	597
15.11.15	Attestazione di conformità, dichiarazione d’incorporazione	597
15.11.16	La clausola di salvaguardia	597
15.12	La norma EN 10218 “Requisiti di sicurezza per robot industriali”	598
15.12.1	Considerazioni generali	598
15.12.2	Spazio protetto, massimo, ristretto e collaborativo	600
15.12.3	Interventi nello spazio protetto	601
15.12.4	Unità portatile di programmazione	602
15.12.5	Modalità operative.	603
15.12.6	Funzionamento automatico	604
15.12.7	Controllo remoto	604
15.12.8	Dispositivo d’estremità, blocchi sui motori	604
15.12.9	Ripari fissi	604
15.12.10	Ripari mobili	605
15.12.11	Dispositivi rilevatori di presenza	605
15.12.12	Programmazione	605
15.12.13	Manutenzione.	606
15.12.14	Istruzione	606
15.12.15	Identificazione dei malfunzionamenti.	606
15.12.16	Ulteriori precauzioni	607
15.12.17	Progetto di una cella di lavoro	607
15.12.18	Celle collaborative	607
15.13	Robot collaborativi: il Technical Specification ISO/TS 15066:2016	609
15.14	Dispositivi di sicurezza.	610
16 [N]	Norme per la misura delle prestazioni dei robot	613
16.1	[!] Introduzione	613

16.2	[!] Criteri generali per la conduzione delle prove	616
16.3	Scelta dei punti di misura.	617
16.4	Accuratezza e ripetibilità per posizionamento unidirezionale . . .	617
16.5	Variazione di accuratezza per posizionamento multidirezionale . .	620
16.6	Errore di distanza.	620
16.7	Misura del tempo di stabilizzazione.	621
16.8	Misura di sovraelongazione di posizionamento.	621
16.9	Misura di deriva temporale di posa	621
16.10	Misure di ripetibilità e accuratezza sulla traiettoria	623
16.11	Sovraelongazione e arrotondamento in percorsi con angoli	623
16.12	Misura delle caratteristiche di velocità.	623
16.13	Tempo di posizionamento.	625
16.14	Rigidezza statica	625
17	[N] Robot industriali: presentazione delle caratteristiche	627
17.1	Introduzione	627
17.2	Riferimenti e definizioni	627
17.3	Unità di misura	628
17.4	Caratteristiche	628
17.4.1	Applicazione	628
17.4.2	Alimentazione di potenza	628
17.4.3	Struttura meccanica	629
17.4.4	Spazio di lavoro	629
17.4.5	Sistemi di coordinate	630
17.4.6	Dimensioni esterne e massa	630
17.4.7	Superficie di montaggio della base.	630
17.4.8	Interfaccia meccanica.	630
17.4.9	Controllo (comando)	631
17.4.10	Metodi di programmazione	631
17.4.11	Ambiente	631
17.4.12	Carico.	632
17.4.13	Velocità	632
17.4.14	Risoluzione.	633
17.4.15	Prestazioni	633
17.4.16	Sicurezza	634
VI	Appendici	635
A	Convenzioni angolari	637
A.1	Sistemi di angoli cardanici ed euleriani	637
A.2	Convenzioni cardaniche	640
A.3	Convenzioni euleriane	641
A.4	Convenzioni cardaniche ed euleriane: velocità e accelerazioni . . .	642
A.4.1	Velocità	642

A.4.2	Accelerazioni	643
A.5	Matrice di rotazione	644
A.6	Asse di rotazione finita (Asse e angolo di Eulero)	645
A.7	Angoli di Eulero	646
A.8	Angoli nautici	647
A.9	Angoli di Cardano (di Tait-Bryan).	648
A.10	Coordinate tubolari	649
A.11	Parametri di Rodriguez-Hamilton	650
A.12	Parametri di Eulero (Quaternioni unitari)	651
A.13	Angoli proiettivi	652
B	Relazioni matematiche utili	653
B.1	Relazioni trigonometriche.	653
B.1.1	Relazioni notevoli	653
B.1.2	Sistemi di equazioni trigonometriche.	654
B.2	Matrici e vettori	655
B.2.1	Derivate di matrici e vettori	655
B.2.2	Ulteriori definizioni riguardanti matrici.	657
B.3	Le funzioni segno e atan2.	658
B.3.1	La funzione segno $\text{sgn}(x)$	658
B.3.2	La funzione $\text{atan2}(y, x)$	659
C	Matrice pseudo-inversa	663
C.1	Generalità.	663
C.2	Particolari pseudo-inverse e principali proprietà	666
C.3	Algoritmo di calcolo della pseudo-inversa	667
D	L'algoritmo di Newton-Raphson	669
E	Ellissi: proprietà e rappresentazioni	673
E.1	Rappresentazioni e proprietà delle ellissi	673
F	Richiami su funzioni di trasferimento e teoria del controllo	677
F.1	Regolazione di un sistema	677
F.2	Funzioni di trasferimento e risposta in frequenza.	679
F.3	Banda passante.	681
F.4	Sistemi del primo ordine	682
F.4.1	Modello	682
F.4.2	Risposta al gradino e alla rampa	683
F.5	Sistemi del secondo ordine	683
F.5.1	Sistemi senza zeri	683
F.5.2	Risposta al gradino	684
F.5.3	Sistemi con uno zero	686
F.6	Stabilità di un sistema lineare	687
F.7	Schemi a blocchi	687

F.8	Sistemi con retroazione.	688
F.9	Stabilità dei sistemi retroazionati.	690
G	Esempio di linguaggio di programmazione di robot	693
G.1	Il linguaggio del robot Icomatic SCARA03	693
G.1.1	Introduzione	693
G.1.2	Tipi di dati.	694
G.1.3	Valori Immediati e Variabili	694
G.1.4	Variabili di Sistema	695
G.1.5	Variabili utente	695
G.1.6	Espressioni	695
G.1.7	Il programma utente	696
G.1.8	Struttura del Programma	696
G.1.9	I comandi	697
	Bibliografia	699