

# Indice Generale

<b>Invito alla lettura</b>	<b>xiii</b>
<b>Simboli e notazioni</b>	<b>xv</b>
<b>1 Automatica, ieri e oggi</b>	<b>1</b>
1.1 Le disavventure di Sir Shovell . . . . .	1
1.2 Missioni cometarye . . . . .	1
1.3 Stima e controllo oggi . . . . .	3
1.3.1 Applicazioni alla navigazione spaziale . . . . .	4
1.3.2 Sottomarino a controllo remoto . . . . .	4
1.3.3 Servosistemi per il controllo di CD e DVD . . . . .	5
1.3.4 Stima e controllo per applicazioni biomediche . . . . .	6
1.4 Verso lo studio dell'automatica . . . . .	7
1.4.1 Dalla realtà all'astrazione e ritorno . . . . .	7
1.4.2 Il processo di "matematizzazione" del reale . . . . .	8
1.4.3 Il percorso di studio . . . . .	9
<b>2 Modelli</b>	<b>13</b>
2.1 Sistemi dinamici . . . . .	13
2.2 Scrittura matriciale di sistemi dinamici lineari . . . . .	21
2.3 Alcune utili classificazioni . . . . .	24
2.4 Modello standard . . . . .	25
2.5 Punto di equilibrio . . . . .	26
2.6 Caratteristica statica . . . . .	30
2.7 Linearizzazione . . . . .	32
2.8 Autovalori di un sistema lineare . . . . .	37
2.9 Movimento libero e movimento forzato . . . . .	39
2.9.1 L'esponenziale . . . . .	40
2.9.2 Movimento libero . . . . .	44
2.9.3 Movimento forzato . . . . .	46
2.10 Principio di sovrapposizione degli effetti . . . . .	48
2.11 Formula di Lagrange . . . . .	49
2.12 Concetto e definizione di stabilità . . . . .	53

2.12.1	Stabilità di un punto di equilibrio . . . . .	53
2.12.2	Stabilità di un movimento . . . . .	59
2.12.3	Stabilità di sistemi lineari . . . . .	61
2.12.4	Criterio di stabilità di Routh-Hurwitz . . . . .	62
2.12.5	Deduzione del criterio di Routh-Hurwitz . . . . .	67
2.12.6	Criterio di stabilità di Kharitonov . . . . .	69
2.12.7	Stabilità del punto di equilibrio nei sistemi non lineari . . . . .	70
2.13	Sommario del capitolo . . . . .	74
<b>3</b>	<b>Segnali e trasformate</b> . . . . .	<b>75</b>
3.1	Richiami sui numeri complessi . . . . .	75
3.2	Trasformata di Laplace . . . . .	78
3.2.1	L'impulso e la sua trasformata . . . . .	79
3.2.2	Lo scalino e la sua trasformata . . . . .	82
3.3	Proprietà della trasformata di Laplace . . . . .	83
3.3.1	Linearità . . . . .	83
3.3.2	Traslazione nel dominio $s$ . . . . .	84
3.3.3	Derivazione nel dominio $s$ . . . . .	85
3.3.4	Derivazione nel dominio del tempo . . . . .	86
3.4	Poli e zeri di un segnale . . . . .	88
3.5	Antitrasformata . . . . .	90
3.6	Teoremi del valore iniziale e del valore finale . . . . .	95
3.7	Deduzione delle proprietà della trasformata di Laplace . . . . .	96
3.7.1	Linearità . . . . .	96
3.7.2	Traslazione in $s$ . . . . .	96
3.7.3	Traslazione in $t$ . . . . .	96
3.7.4	Derivata in $t$ . . . . .	97
3.7.5	Derivata in $s$ . . . . .	98
3.7.6	Teorema del valore iniziale . . . . .	98
3.7.7	Teorema del valor finale . . . . .	98
3.8	Segnali razionali . . . . .	99
3.8.1	Segnali del primo ordine . . . . .	99
3.8.2	Segnali del secondo ordine . . . . .	100
3.9	Segnali vettoriali . . . . .	103
3.10	Sommario del capitolo . . . . .	104
<b>4</b>	<b>Sistemi e trasformate</b> . . . . .	<b>107</b>
4.1	Funzione di trasferimento . . . . .	107
4.2	Funzione di trasferimento da un modello di stato . . . . .	108
4.2.1	Guadagno . . . . .	111
4.2.2	Denominatore . . . . .	112
4.2.3	Numeratore . . . . .	112
4.2.4	Poli e Zeri di un sistema . . . . .	112
4.3	Funzione di trasferimento da un modello ingresso-uscita . . . . .	118
4.4	Grado relativo . . . . .	123

4.5	Matrice di trasferimento . . . . .	125
4.6	Schemi a blocchi . . . . .	125
4.6.1	Cascata . . . . .	127
4.6.2	Parallelo . . . . .	130
4.7	Stabilità dei sistemi interconnessi . . . . .	132
4.8	Sommario del capitolo . . . . .	134
<b>5</b>	<b>Risposte dei sistemi lineari</b>	<b>135</b>
5.1	Risposta impulsiva di un sistema del primo ordine . . . . .	135
5.2	Risposta a scalino di un sistema del primo ordine . . . . .	136
5.3	Risposta impulsiva di un sistema del secondo ordine . . . . .	137
5.3.1	Poli reali distinti . . . . .	137
5.3.2	Poli reali coincidenti . . . . .	139
5.3.3	Poli complessi coniugati . . . . .	140
5.4	Risposta a scalino di un sistema del secondo ordine . . . . .	145
5.5	Risposta a scalino di un sistema del secondo ordine con uno zero e due poli coincidenti . . . . .	147
5.6	Risposta libera . . . . .	150
5.7	Sommario del capitolo . . . . .	151
<b>6</b>	<b>Risposta in frequenza</b>	<b>153</b>
6.1	Risposta sinusoidale (sistemi a stato scalare) . . . . .	153
6.1.1	Pulsazione . . . . .	154
6.1.2	Ampiezza e fase . . . . .	154
6.1.3	Ricavo di ampiezza e fase dalla funzione di trasferimento . . . . .	155
6.2	Risposta sinusoidale (in generale) . . . . .	156
6.3	Risonanza . . . . .	159
6.4	Risposta armonica . . . . .	161
6.5	Risposta periodica . . . . .	162
6.6	Rappresentazione della risposta in frequenza . . . . .	168
6.6.1	Diagrammi polari . . . . .	168
6.6.2	Diagrammi di Nyquist . . . . .	175
6.6.3	Diagrammi cartesiani o di Bode del modulo . . . . .	177
6.6.4	Regola per il tracciamento del diagramma di Bode del modulo . . . . .	184
6.6.5	Diagrammi di Bode della fase . . . . .	184
6.6.6	Regola per il tracciamento del diagramma di Bode della fase . . . . .	187
6.6.7	Tracciamento dei diagrammi di Bode nel caso di sistemi con poli e zeri nell'origine . . . . .	188
6.6.8	Tracciamento dei diagrammi polari e di Nyquist nel caso di sistemi con poli e zeri nell'origine . . . . .	190
6.6.9	Tracciamento dei diagrammi polare e di Nyquist nel caso di sistemi con zeri e poli sull'asse immaginario . . . . .	194

6.6.10	Tracciamento dei diagrammi nel caso di sistemi con poli complessi e coniugati . . . . .	197
6.6.11	Effetto di zeri e poli sulla risposta sinusoidale . . . . .	201
6.6.12	Dal diagramma di Bode del modulo al diagramma di Bode della fase . . . . .	203
6.6.13	Le due forme in cui si esprime una funzione di trasferimento	205
6.7	Ricavo del modello da prove sperimentali . . . . .	206
6.8	Sommario del capitolo . . . . .	214
<b>7</b>	<b>Connessione in retroazione</b>	<b>215</b>
7.1	Sistemi retroazionati . . . . .	215
7.2	Descrizione complessiva di un sistema retroazionato . . . . .	216
7.3	Interconnessioni complesse . . . . .	220
7.4	Risposta in frequenza dei sistemi retroazionati . . . . .	222
7.5	Sommario del capitolo . . . . .	227
<b>8</b>	<b>Sistemi di controllo</b>	
	<b>Analisi e progetto con l'approccio in frequenza</b>	<b>229</b>
8.1	La sconfinata varietà dei problemi di controllo . . . . .	229
8.1.1	Controllo della glicemia . . . . .	229
8.1.2	Controllo dei farmaci in anestesia . . . . .	230
8.1.3	Controllo d'assetto di veicoli spaziali . . . . .	231
8.1.4	Controllo elettronico di stabilità nelle automobili . . . . .	231
8.1.5	Gestione dei processi per la produzione di energia elettrica	232
8.1.6	Regolazione della rete elettrica nazionale . . . . .	235
8.1.7	Controllo dei compressori . . . . .	236
8.1.8	Controllo di robot . . . . .	237
8.2	Il problema del controllo . . . . .	237
8.2.1	Controllo in anello aperto e controllo in anello chiuso . . . . .	237
8.2.2	Disturbi . . . . .	239
8.2.3	Schemi di controllo . . . . .	243
8.2.4	Struttura di un sistema di controllo in catena chiusa . . . . .	248
8.3	Analisi dei sistemi retroazionati lineari . . . . .	252
8.3.1	La "banda dei quattro" . . . . .	253
8.3.2	Stabilità - Criteri di Nyquist e di Bode . . . . .	258
8.3.3	Banda passante e velocità di risposta . . . . .	267
8.3.4	Costellazione polare: il Luogo delle Radici . . . . .	270
8.3.5	Regole di tracciamento del Luogo delle Radici . . . . .	273
8.3.6	Errore a transitorio esaurito . . . . .	277
8.3.7	Effetto dei disturbi . . . . .	281
8.3.8	Sistemi di controllo con ritardo . . . . .	283
8.4	Progetto del controllore, problema base di regolazione . . . . .	288
8.4.1	Enunciato del problema e considerazioni preliminari . . . . .	288
8.4.2	Progetto statico . . . . .	289
8.4.3	Progetto dinamico . . . . .	291

8.4.4	Controllori P, PI e PID . . . . .	297
8.5	Sommario del capitolo . . . . .	306
<b>9</b>	<b>Sistemi di controllo</b>	
	<b>Analisi e progetto con l'approccio di stato</b>	<b>309</b>
9.1	Cambio di base . . . . .	309
9.2	Raggiungibilità . . . . .	311
9.3	Scomposizione di raggiungibilità . . . . .	315
9.4	Osservabilità . . . . .	317
9.5	Scomposizione di osservabilità . . . . .	317
9.6	Scomposizione canonica . . . . .	318
9.7	Realizzazione . . . . .	320
9.8	Stabilizzazione . . . . .	326
9.9	Stabilizzazione mediante retroazione dallo stato . . . . .	327
9.10	Stabilizzazione mediante retroazione dall'uscita . . . . .	330
	9.10.1 Stima dello stato . . . . .	330
	9.10.2 Stima dello stato mediante osservatore ridotto . . . . .	332
	9.10.3 Stabilizzazione dall'uscita . . . . .	337
9.11	Problema base di regolazione nell'approccio di stato . . . . .	339
	9.11.1 Formulazione del problema base . . . . .	339
	9.11.2 Riformulazione del problema base mediante il sistema $S^+$ . . . . .	342
	9.11.3 Proprietà strutturali del sistema $S^+$ . . . . .	343
	9.11.4 Formulazione del problema base di regolazione su $S^+$ . . . . .	345
9.12	Soluzione del problema base . . . . .	346
9.13	Sommario del capitolo . . . . .	352
<b>10</b>	<b>Sistemi digitali</b>	<b>353</b>
10.1	Segnali a tempo discreto e trasformata Zeta . . . . .	353
	10.1.1 L'impulso e la sua trasformata . . . . .	354
	10.1.2 Lo scalino e la sua trasformata . . . . .	354
10.2	Proprietà della trasformata Zeta . . . . .	355
	10.2.1 Linearità . . . . .	355
	10.2.2 Contrazione in Zeta . . . . .	356
	10.2.3 Derivata in Zeta . . . . .	356
10.3	Poli e zeri di un segnale a tempo discreto . . . . .	359
10.4	L'operatore $z$ e l'operatore $z^{-1}$ . . . . .	361
10.5	Antitrasformazione . . . . .	362
	10.5.1 Antitrasformazione mediante sviluppo di Heaviside . . . . .	362
	10.5.2 Antitrasformazione mediante lunga divisione . . . . .	365
10.6	Teoremi del valore iniziale e del valore finale . . . . .	366
	10.6.1 Teorema del valor iniziale . . . . .	367
	10.6.2 Teorema del valor finale . . . . .	367
10.7	Deduzione delle proprietà della trasformata Zeta . . . . .	367
	10.7.1 Linearità . . . . .	367
	10.7.2 Contrazione in Zeta . . . . .	367

10.7.3	Derivata in Zeta . . . . .	367
10.7.4	Teorema del valor iniziale . . . . .	368
10.7.5	Teorema del valor finale . . . . .	368
10.8	Applicazione alla soluzione di equazioni alle differenze . . . . .	369
10.9	Trasformate di vettori . . . . .	370
10.10	Sistemi e trasformate . . . . .	371
10.10.1	Modello standard e formula di Lagrange . . . . .	371
10.10.2	Punto di equilibrio e guadagno . . . . .	372
10.10.3	Funzione di trasferimento Zeta . . . . .	373
10.11	Stabilità . . . . .	376
10.11.1	Definizione e criterio degli autovalori . . . . .	376
10.11.2	Test di stabilità . . . . .	377
10.12	Risposte tipiche . . . . .	385
10.12.1	Risposta impulsiva . . . . .	385
10.12.2	Risposta a scalino . . . . .	386
10.13	Risposta in frequenza . . . . .	387
10.13.1	Risposta sinusoidale . . . . .	387
10.13.2	Diagrammi polari e diagrammi di Nyquist . . . . .	388
10.13.3	Prova del teorema della risposta in frequenza . . . . .	394
10.14	Sistemi interconnessi . . . . .	395
10.15	Sistemi a segnali campionati . . . . .	396
10.15.1	Campionamento e tenuta di segnali . . . . .	396
10.15.2	Dal sistema analogico al sistema digitale . . . . .	399
10.15.3	La trasformazione del campionamento . . . . .	402
10.15.4	Autovalori dei sistemi a segnali campionati e stabilità . . . . .	407
10.15.5	Guadagno dei sistemi a segnali campionati . . . . .	408
10.15.6	Zeri dei sistemi a segnali campionati . . . . .	409
10.16	Sommario del capitolo . . . . .	412
<b>11</b>	<b>Zibaldone storico</b>	<b>413</b>
11.1	Un quarto di millennio fa . . . . .	413
11.2	Il secolo ventesimo . . . . .	418
11.3	Tre concetti basilari . . . . .	418
11.3.1	Sistema dinamico . . . . .	419
11.3.2	Stabilità . . . . .	419
11.3.3	Retroazione . . . . .	420
11.4	Gli anni 40: servomeccanismi e cibernetica . . . . .	420
11.5	1956: il Big Bang . . . . .	422
11.5.1	Convegno internazionale sui Problemi dell'Automatismo (Milano, 8-13 aprile) . . . . .	422
11.5.2	Automatic Control Congress (Heidelberg, 25-29 settembre)	422
11.6	L'automatica rifondata: gli anni 60 e il nuovo paradigma scientifico	424
11.7	Cinquant'anni dopo . . . . .	426
11.8	Successi di oggi	428

<b>Appendice - Introduzione a Matlab</b>	<b>429</b>
A.1 Variabili ed espressioni . . . . .	430
A.2 Alcune espressioni di uso comune . . . . .	431
A.3 Definizione di matrici . . . . .	431
A.4 Definizione di vettori . . . . .	433
A.5 Funzioni elementari per scalari . . . . .	433
A.6 Funzioni elementari per matrici . . . . .	434
A.7 Polinomi . . . . .	434
A.8 Visualizzazione dei grafici . . . . .	435
A.9 Istruzioni per applicazioni di controllo . . . . .	437
A.10 L'applicazione Simulink . . . . .	442
<b>T - Esercizi - Testi</b>	<b>447</b>
T.1 Trasformata di Laplace . . . . .	447
T.2 Analisi di sistemi in variabili di stato . . . . .	448
T.3 Schemi a blocchi e analisi dei sistemi interconnessi . . . . .	450
T.4 Rappresentazioni della risposta in frequenza . . . . .	453
T.5 Luogo delle radici . . . . .	455
T.6 Sistemi digitali . . . . .	456
<b>S - Esercizi - Soluzioni</b>	<b>459</b>
S.1 Trasformata di Laplace . . . . .	459
S.2 Analisi di sistemi in variabili di stato . . . . .	462
S.3 Schemi a blocchi e analisi dei sistemi interconnessi . . . . .	469
S.4 Rappresentazioni della risposta in frequenza . . . . .	477
S.5 Luogo delle radici . . . . .	482
S.6 Sistemi digitali . . . . .	484
<b>Indice analitico</b>	<b>489</b>