

システム制御工学 I・II

平田 研二

Copyright ©2019 by Kenji Hirata

preamble

システム制御工学 I・II

--

目次

preamble	i
第1章 はじめに	1
第I部 動的なシステムの解析	3
第2章 動的なシステムのモデリングと表現	5
2.1 静的なシステム	5
2.2 動的なシステム	6
2.3 モデリングとブロック線図による表現	8
2.3.1 微分方程式によるモデリング	8
2.3.2 ブロック線図による表現: その1	9
2.3.3 状態空間表現によるモデリング	10
2.3.4 伝達関数によるモデリング	13
2.3.5 ブロック線図による表現: その2	15
2.3.6 状態空間表現と伝達関数	17
2.4 モデリング	22
2.4.1 RLC 回路	22
2.4.2 回転運動	24
2.4.3 DC モータ	26
2.5 演習問題	31
2.6 演習問題 サンプル解答	37
第3章 ラプラス変換の復習	41
3.1 ラプラス変換	41
3.2 ラプラス変換の性質	44
3.3 ラプラス変換と微分方程式	47
3.4 ラプラス変換と伝達関数	51
3.5 演習問題	53
3.6 演習問題 サンプル解答	54
第4章 伝達関数と状態空間表現に関するいくつかの考察	57
4.1 状態空間表現の次元 n と伝達関数の次数 n_d に関する考察	57
4.2 伝達関数の極 p_i と零点 z_j	60
4.3 極 p_i と固有値 λ_i に関する考察	61
4.3.1 固有値, 固有ベクトルについての簡単な復習	61

4.3.2	極 p_i と固有値 λ_i について	64
4.4	伝達関数と共役複素数について	66
4.4.1	複素数についての簡単な復習	66
4.4.2	伝達関数と共役複素数に関するまとめ	67
4.5	線型性	68
4.6	演習問題	70
4.7	演習問題 サンプル解答	71
第 5 章	動的なシステムの応答	73
5.1	伝達関数の出力	73
5.2	状態方程式の解	74
5.3	行列の指数関数	76
5.3.1	ラプラス変換を利用した e^{At} の計算	79
5.4	状態方程式の解: つづき	81
5.5	状態方程式の解についてのまとめ	82
5.5.1	零入力応答, 零状態応答と伝達関数の出力に関する補足	84
5.6	一次の伝達関数のステップ応答	85
5.7	二次の伝達関数のステップ応答	88
5.8	演習問題	93
5.9	演習問題 サンプル解答	95
第 6 章	可制御性	97
6.1	可制御性	97
6.2	可制御部分空間	98
6.3	可制御性グラミアンと可制御部分空間	98
6.4	可制御性行列と可制御部分空間	100
6.5	可制御性のまとめ	102
6.6	演習問題	103
6.7	演習問題	104
第 7 章	動的なシステムの安定性	105
7.1	安定性とは	105
7.1.1	伝達関数の出力 (零状態出力) の例	105
7.1.2	零入力応答の例	106
7.1.3	安定性の定義: 有界入力有界出力安定性	109
7.1.4	安定性の定義: 漸近安定性	114
7.2	有界入力有界出力安定性についての考察	115
7.3	有界入力有界出力安定性	118
7.4	有界入力有界出力安定性についてのまとめ	120
7.5	漸近安定性についての考察: その 1	122
7.6	漸近安定性についての考察: その 2	127
7.7	漸近安定性	129
7.8	漸近安定性についてのまとめ	131
7.9	演習問題	133

7.10 演習問題 サンプル解答	135
第 8 章 動的なシステムの周波数応答	137
8.1 周波数応答とは	137
8.2 周波数応答についての考察	142
8.3 周波数応答	145
8.4 周波数応答についてのまとめ	149
8.5 周波数伝達関数	149
8.6 演習問題	157
8.7 演習問題 サンプル解答	160
第 9 章 周波数応答とボード線図, ベクトル軌跡	165
9.1 周波数伝達関数とボード線図, ベクトル軌跡	165
9.2 ボード線図	166
9.3 バンド幅とピークゲイン	175
9.4 ボード線図の折れ線近似	181
9.4.1 一次の伝達関数のボード線図	181
9.4.2 高次の伝達関数のボード線図	182
9.5 ベクトル軌跡	186
9.6 演習問題	197
9.7 演習問題 サンプル解答	206
第 II 部 フィードバック制御系の設計	213
第 10 章 フィードバック vs フィードフォワード	215
10.1 フィードフォワード制御系とフィードバック制御系	215
10.2 フィードバック構造の効用 1	219
10.3 フィードバック構造の効用 2	221
10.4 感度関数と相補感度関数	224
10.5 フィードバック制御の難しさ	227
10.5.1 不安定な制御対象の安定化	227
10.5.2 フィードバックによる不安定化	229
10.6 演習問題	232
10.7 演習問題 サンプル解答	234
第 11 章 フィードバック制御系の安定性	237
11.1 制御対象とコントローラの表現	237
11.2 フィードバック制御系の安定性: 有界入力有界出力安定性 . . .	239
11.3 特性多項式	243
11.4 フィードバック制御系の安定性: 漸近安定性	248
11.4.1 漸近安定性と有界入力有界出力安定性	250
11.4.2 補 足	252
11.5 演習問題	254

11.6 演習問題 サンプル解答	256
第 12 章 状態フィードバックによる安定化	261
12.1 状態フィードバックによる安定化	261
12.2 演習問題	262
12.3 演習問題 サンプル解答	263
第 13 章 ナイキストの安定判別法	265
13.1 フィードバック制御系の安定性: 安定余裕を考える	265
13.2 ナイキストの安定判別法: 準備	267
13.3 ナイキストの安定判別法: 導出	269
13.3.1 偏角の原理	269
13.3.2 ナイキストの安定判別法	271
13.4 ナイキストの安定判別法: 使い方	273
13.5 簡略化されたナイキストの安定判別法	276
13.5.1 安定余裕: ゲイン余裕と位相余裕	278
13.6 演習問題	283
13.7 演習問題 サンプル解答	288
第 14 章 ループ整形法によるフィードバック制御系の設計	291
14.1 ループ整形法の考え方	291
14.2 ループ整形のポイント	293
14.2.1 ループ整形のポイント: ゲイン交差周波数 ω_{gc}	293
14.2.2 ループ整形のポイント: 低周波数ゲイン $\lim_{\omega \rightarrow 0} L(j\omega) $	295
14.2.3 ループ整形のポイント: 位相余裕 PM	298
14.2.4 ループ整形のポイント: まとめ	299
14.3 ループ整形法	301
14.3.1 ポイント 1 の改善: 比例コントローラ	301
14.3.2 ポイント 2 の改善: 位相遅れ (PI) コントローラ	303
14.3.3 ポイント 3 の改善: 位相進みコントローラ	306
14.3.4 位相遅れ・進みコントローラによるフィードバック制御 系の設計	310
14.4 演習問題	314
14.5 演習問題 サンプル解答	321
第 15 章 二自由度制御系	323
付 録 A 付録 1.	329
postamble	335

目 次

2.1	バネ系	5
2.2	マス系	6
2.3	マス - バネ - ダンパ系	8
2.4	マス - バネ - ダンパ系のブロック線図 その 1	9
2.5	マス - バネ - ダンパ系のブロック線図 その 2	9
2.6	マス - バネ - ダンパ系のブロック線図 その 2 の答え	10
2.7	ブロック線図の主要要素	10
2.8	状態空間表現のブロック線図	12
2.9	マス - バネ - ダンパ系のブロック線図	15
2.10	マス - バネ - ダンパ系のブロック線図の変形	16
2.11	ブロック線図の主要要素	17
2.12	状態空間表現のブロック線図	20
2.13	RLC 回路	22
2.14	RLC 回路のブロック線図	23
2.15	剛体の回転運動	24
2.16	回転運動系のブロック線図	25
2.17	DC モータを利用した負荷の回転運動	27
2.18	DC モータのブロック線図 その 1	29
2.19	DC モータのブロック線図 その 2	29
2.20	DC モータのブロック線図 その 3	30
2.21	マス - バネ系	31
2.22	マス - ダンパ系	32
2.23	バネ - ダンパ系	32
2.24	R 回路	32
2.25	RL 回路	33
2.26	RC 回路	33
2.27	剛体の回転運動	34
2.28	剛体の回転運動	34
2.29	DC モータ	35
2.30	マス - ダンパ系	36
2.31	ブロック線図	36
2.32	マス-バネ系のブロック線図	37
2.33	マス-ダンパ系のブロック線図	38
2.34	バネ-ダンパ系のブロック線図	38
2.35	RL 回路のブロック線図	39

2.36 RC 回路のブロック線図	39
4.1 複素数 $z = x + jy$ の絶対値 $ z $, 偏角 $\angle z$, 共役複素数 $\bar{z}$	66
5.1 伝達関数の出力	73
5.2 状態方程式の解と出力	75
5.3 状態方程式の解と出力 その 2	83
5.4 零状態応答と出力	84
5.5 1 次の伝達関数のステップ応答, T を変えた場合	87
5.6 $e^{-at} \cos \omega t$ と $e^{-at} \sin \omega t$ の例	90
5.7 二次の伝達関数のステップ応答, ω_n を変えた場合	91
5.8 二次の伝達関数のステップ応答, ζ を変えた場合	92
5.9 オープンループシステム	93
5.10 入力信号	93
7.1 伝達関数の応答 (零状態出力) のイメージ	105
7.2 $G(s) = 1/(s + 1)$ の応答の例	106
7.3 $G(s) = 2/(s^2 + 3s + 2)$ の応答の例	107
7.4 $G(s) = 0.2/(s^2 + 0.8s - 0.2)$ の応答の例	108
7.5 $G(s) = 1/s$ の応答例	109
7.6 零入力応答のイメージ	109
7.7 零入力応答の例	110
7.8 零入力応答の例	111
7.9 零入力応答の例	112
7.10 零入力応答の例	113
7.11 e^{at} , $a = 2 > 0$	113
7.12 フィードバック制御系	133
7.13 線形システム	134
8.1 周波数応答のイメージ	137
8.2 静的なシステムの周波数応答の例	138
8.3 伝達関数 $1/(s + 1)$ の周波数応答の例	139
8.4 伝達関数 $10/(s + 10)$ の周波数応答の例	140
8.5 伝達関数 $1/(s^2 + 0.8s + 1)$ の周波数応答の例	141
8.6 伝達関数 $G(s) = s$ のベクトル軌跡	150
8.7 伝達関数 $G(s) = 1/s$ のベクトル軌跡	151
8.8 伝達関数 $G(s) = 1/(s + 1)$ のベクトル軌跡	151
8.9 伝達関数 $G(s) = 1/s^2$ のベクトル軌跡	152
8.10 伝達関数 $G(s) = \omega_n^2/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\zeta = 0.9$, $\omega_n = 1$ のベ クトル軌跡	153
8.11 伝達関数 $1/(s + 1)$ の周波数応答の例 (再掲)	154
8.12 伝達関数 $10/(s + 10)$ の周波数応答の例 (再掲)	155
8.13 伝達関数 $1/(s^2 + 0.8s + 1)$ の周波数応答の例 (再掲)	156
8.14 周波数応答の概念図	157

8.15	マス – ダンパ系のフィードバック制御	158
9.1	伝達関数 s のボード線図, ベクトル軌跡	167
9.2	伝達関数 $1/s$ のボード線図, ベクトル軌跡	168
9.3	伝達関数 $1/s^2$ のボード線図, ベクトル軌跡	169
9.4	伝達関数 $1/(s + 1)$ のボード線図, ベクトル軌跡	170
9.5	伝達関数 $1/(Ts + 1)$ のボード線図, ベクトル軌跡, T を変えた 場合	171
9.6	複素数 $(1 - \Omega^2) + j2\zeta\Omega$, $\zeta = 0.9$ の観察	172
9.7	伝達関数 $G(s) = \omega_n^2/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\zeta = 0.9$, $\omega_n = 1$ のボー ド線図, ベクトル軌跡	173
9.8	伝達関数 $G(s) = \omega_n^2/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\zeta = 0.9$ のボード線図, ベクトル軌跡, ω_n を変えた場合	174
9.9	伝達関数 $G(s) = \omega_n^2/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\omega_n = 1$ のボード線図, ベクトル軌跡, ζ を変えた場合	175
9.10	伝達関数 $1/(s + 1)$ のボード線図と周波数応答の例	176
9.11	伝達関数 $10/(s + 10)$ のボード線図と周波数応答の例	177
9.12	伝達関数 $1/(Ts + 1)$ のボード線図とステップ応答, T を変え た場合	178
9.13	伝達関数 $G(s) = \omega_n^2/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\zeta = 0.9$ のボード線図 とステップ応答, ω_n を変えた場合	179
9.14	伝達関数 $1/(s^2 + 0.8s + 1)$ のボード線図と周波数応答の例	180
9.15	伝達関数 $G(s) = \omega_n^2/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\omega_n = 1$ のボード線図 と周波数応答の例, ζ を変えた場合	181
9.16	伝達関数 $G(s) = \omega_n^2/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\omega_n = 1$ のボード線図 とステップ応答, ζ を変えた場合	182
9.17	伝達関数 $(100s + 100)/(s^2 + 10s)$ のボード線図	183
9.18	$1/(Ts + 1)$ のボード線図	184
9.19	$1/(Ts + 1)$ のゲイン線図の折れ線近似	185
9.20	$1/(Ts + 1)$ の位相線図の折れ線近似	186
9.21	$1/(Ts + 1)$ のボード線図の折れ線近似	187
9.22	直列接続 $G(s) = G_1(s)G_2(s) = 10 \times (1/(s + 1))$ のボード線図	188
9.23	伝達関数 $1/G(s) = 10s + 1$ のボード線図	189
9.24	ゲイン線図の折れ線近似	190
9.25	位相線図の折れ線近似	191
9.26	伝達関数 s のボード線図, ベクトル軌跡	192
9.27	伝達関数 $1/s$ のボード線図, ベクトル軌跡	192
9.28	伝達関数 $1/s^2$ のボード線図, ベクトル軌跡	193
9.29	伝達関数 $1/(s + 1)$ のボード線図, ベクトル軌跡	193
9.30	伝達関数 $1/(Ts + 1)$ のボード線図, ベクトル軌跡	194
9.31	伝達関数 $G(s) = \omega_n^2/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\zeta = 0.9$, $\omega_n = 1$ のボー ド線図, ベクトル軌跡	194

9.32 伝達関数 $G(s) = \omega_n^2 / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\zeta = 0.9$ のボード線図, ベクトル軌跡	195
9.33 伝達関数 $G(s) = \omega_n^2 / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, $\omega_n = 1$ のボード線図, ベクトル軌跡	195
9.34 伝達関数 $1/(s(s+1))$ のボード線図, ベクトル軌跡	196
9.35 演習問題 9.5	198
9.36 演習問題 9.6	199
9.37 演習問題 9.7: ボード線図	202
9.38 演習問題 9.7: ステップ応答	203
9.39 演習問題 9.8: ボード線図	204
9.40 演習問題 9.8: ステップ応答	205
9.41 演習問題 サンプル解答 9.1	209
9.42 演習問題 サンプル解答 9.3	210
9.43 演習問題 サンプル解答 9.5	210
9.44 演習問題 サンプル解答 9.6	211
9.45 演習問題 サンプル解答 9.7: G_3 のボード線図	211
9.46 演習問題 サンプル解答 9.8: G_3 のボード線図	212
10.1 一般的な動的システム	215
10.2 制御対象とコントローラ	215
10.3 制御系の構成	216
10.4 電車の特性	216
10.5 電車の速度制御	217
10.6 制御対象 P のステップ応答	218
10.7 制御対象 P のステップ応答	218
10.8 フィードバック制御系のステップ応答	219
10.9 特性変動後のステップ応答, $K = 0.3$	220
10.10 特性変動後のステップ応答, $K = 0.7$	220
10.11 特性変動後のステップ応答, $T = 0.6$	221
10.12 特性変動後のステップ応答, $T = 1.4$	221
10.13 外乱が加わる場合の電車の速度制御	222
10.14 外乱が加わるフィードバック制御系	223
10.15 外乱が加わる場合の応答,	223
10.16 感度関数 $S(j\omega)$ のボード線図	226
10.17 相補感度関数 $T(j\omega)$ のボード線図	226
10.18 <code>sys = feedback(sys01, sys02)</code>	226
10.19 不安定な制御対象の安定化	227
10.20 制御対象 P のステップ応答	229
10.21 フィードバック制御系のステップ応答, $C(s) = 1$	230
10.22 フィードバック制御系のステップ応答, $C(s) = 1/s$	230
10.23 フィードバック制御系のステップ応答, $C(s) = 5/s$	230
10.24 フィードバック制御系のステップ応答, $C(s) = 18/s$	231
10.25 フィードバック制御系のステップ応答, $C(s) = 24/s$	231

10.26 ラジコン船	232
10.27 2つの制御系	232
10.28 フィードフォワード制御系とフィードバック制御系	232
11.1 フィードバック制御系	238
11.2 ステップ応答	240
11.3 外乱 w を考慮したフィードバック制御系	240
11.4 外乱 $w = 0.1$ が加わる場合の応答	240
11.5 フィードバック制御系の安定性	241
11.6 外乱 $w = 0.1$ が加わる場合の応答	247
11.7 フィードバック制御系	255
13.1 フィードバック制御系と開ループ伝達関数 $L(s) = P(s)C(s)$	266
13.2 $G_{yr}(s)$ のステップ応答	266
13.3 開ループ伝達関数 $L(s) = P(s)C(s)$ のボード線図	267
13.4 閉曲線 C 上を時計回りに 1 周する変数 $\bar{s}$ とその時の像	270
13.5 $\angle(\bar{s} - z_1)$ の総変化量は -360 [deg]	270
13.6 右反平面を覆う閉曲線 C 上を時計回りに 1 周する変数 $\bar{s}$ とその時の像 $F(\bar{s})$	272
13.7 変数 $\bar{s}$ が閉曲線 C 上を時計回りに 1 周する時の像 $L(\bar{s})$	272
13.8 $L(s) = P(s)C(s) = \frac{1}{s+1}$ のナイキスト軌跡	274
13.9 $L(s) = P(s)C(s) = \frac{k}{(s+0.1)(s+1)^2}$ のナイキスト軌跡	275
13.10 $L(s) = P(s)C(s) = \frac{k}{(s+0.1)(s+1)^2}$ のナイキスト軌跡拡大図	275
13.11 $G_{yr}(s)$ のステップ応答	275
13.12 簡略化されたナイキストの安定判別法	277
13.13 $L(s) = P(s)C(s) = \frac{k}{s(s+0.1)(s+1)}$ のベクトル軌跡	277
13.14 安定余裕: ゲイン余裕と位相余裕	279
13.15 $L(s) = P(s)C(s) = \frac{1}{s(s+1)^2}$ のベクトル軌跡とボード線図	280
13.16 $L(s) = P(s)C(s) = \frac{k}{(s+0.1)(s+1)^2}$ のボード線図	281
13.17 ベクトル軌跡	283
13.18 ベクトル軌跡	284
13.19 ボード線図	284
13.20 ボード線図	285
13.21 ステップ応答	285
13.22 ベクトル軌跡	288
13.23 ボード線図	289
14.1 フィードバック制御系と開ループ伝達関数 $L(s) = P(s)C(s)$	291
14.2 とあるフィードバック制御系: 開ループ特性 $L(j\omega)$	292
14.3 とあるフィードバック制御系: ステップ応答	292

14.4 ゲイン交差周波数 ω_{gc} (バンド幅 ω_{bw}) の異なるフィードバック 制御系: 開ループ特性 $L(j\omega)$	293
14.5 ゲイン交差周波数 ω_{gc} (バンド幅 ω_{bw}) の異なるフィードバック 制御系: ステップ応答	294
14.6 ゲイン交差周波数 ω_{gc} (バンド幅 ω_{bw}) の異なるフィードバック 制御系: 開ループ特性 $L(j\omega)$ と閉ループ特性 $G_{zr}(j\omega) = T(j\omega)$	295
14.7 低周波数ゲイン $\lim_{\omega \rightarrow 0} L(j\omega) $ の異なるフィードバック制御系: 開 ループ特性 $L(j\omega)$	296
14.8 低周波数ゲイン $\lim_{\omega \rightarrow 0} L(j\omega) $ の異なるフィードバック制御系: ス テップ応答	296
14.9 位相余裕 PM の異なるフィードバック制御系: 開ループ特性 $L(j\omega)$	299
14.10 位相余裕 PM の異なるフィードバック制御系: ステップ応答	299
14.11 ループ整形法によるフィードバック制御系の設計例: ボード線図	300
14.12 ループ整形法によるフィードバック制御系の設計例: ステップ 応答	300
14.13 ゲイン交差周波数 ω_{gc} (バンド幅 ω_{bw}) の異なるフィードバック 制御系: 開ループ特性 $L(j\omega)$	301
14.14 ゲイン交差周波数 ω_{gc} (バンド幅 ω_{bw}) の異なるフィードバック 制御系: ステップ応答	302
14.15 比例コントローラによる安定性の劣化: 開ループ特性 $L(j\omega)$	303
14.16 比例コントローラによる安定性の劣化: ステップ応答	303
14.17 位相遅れコントローラのボード線図 (実線は $\omega_2 \rightarrow 0$ とした場合)	304
14.18 開ループ伝達関数 $L_0(s)$, $L_1(s)$ と $L_2(s)$	305
14.19 フィードバック制御系のステップ応答	305
14.20 位相進みコントローラのボード線図	307
14.21 位相進みコントローラのボード線図	307
14.22 開ループ伝達関数 $L_0(s)$, $L_1(s)$ と $L_2(s)$	308
14.23 ステップ応答	309
14.24 位相進みコントローラ $C(s) = k \sqrt{\frac{\omega_3}{\omega_4}} \frac{s + \omega_4}{s + \omega_3}$, $k = 100$, $\omega_3 =$ $10\sqrt{10}$, $\omega_4 = \sqrt{10}$ のボード線図	309
14.25 開ループ特性 $L_1(s)$, $L_2(s)$ と $L_3(s)$	311
14.26 フィードバック制御系のステップ応答, $C_3(s) = k \frac{s + \omega_1}{s} \sqrt{\frac{\omega_3}{\omega_4}} \frac{s + \omega_4}{s + \omega_3}$, $k = 20$, $\omega_1 = 0.2$, $\omega_3 = 6$, $\omega_4 = 0.6$ の場合	311
14.27 観測ノイズが混入する制御系	312
14.28 観測ノイズが混入する場合のステップ応答	313
14.29 開ループ特性 $L_0(s)$ と $L_1(s)$	314
14.30 フィードバック制御系のステップ応答	314
14.31 開ループ特性 $L_2(s)$ と $L_3(s)$	315
14.32 フィードバック制御系のステップ応答	316
14.33 ボード線図	316
14.34 ステップ応答	317

14.35ボード線図	317
14.36ボード線図	318
14.37ステップ応答	319
14.38ボード線図	322
14.39ボード線図	322
15.3 ステップ応答: $L_0(s) = P(s)$ のとき	326
15.4 ステップ応答: $L_1(s) = P(s)C_1(s)$ のとき	326
15.5 ステップ応答: $L_1(s) = P(s)C_1(s)C_2(s)$ のとき	327
15.6 ステップ応答: $L_3(s) = P(s)C_1(s)C_2(s)C_3(s)$ のとき	327
15.7 規範モデル $W(s)$ のステップ応答	327
15.8 ボード線図: $L_3(s) = P(s)C_1(s)C_2(s)C_3(s)$	328
15.9 ステップ応答: $L_3(s) = P(s)C_1(s)C_2(s)C_3(s)$ のとき	328
15.10ステップ応答: $L_3(s) = P(s)C_1(s)C_2(s)C_3(s)$ のとき	328

--

表 目 次

2.1	パラメータ: DC モータを利用した負荷の回転運動	28
3.1	基本的な関数のラプラス変換表	47
9.1	$ G(j\omega) $, $\log G(j\omega) $ と $20 \log G(j\omega) $ [dB]	166

索引

- adjoint, 22
- bode, 146, 159, 163, 166
- det, 22
- eig, 60, 123
- expm, 77
- eye, 21
- feedback, 217, 240
- freqresp, 146
- ilaplace, 46
- imag, 146
- initial, 80
- inv, 21
- laplace, 43
- lsim, 134
- margin, 270
- minreal, 61
- nyquist, 146, 264
- pole, 56, 61, 114, 240
- poly2sym, 236
- real, 146
- solve, 236
- ss, 12, 62
- ssdata, 12
- step, 70, 81, 83, 88
- syms, 21, 22, 43, 46, 77, 236
- tf, 14, 19, 57
- zero, 56
- zpk, 57
- RLC 回路, 22
- 安定性, 289
- 位相遅れコントローラ, 293
- 位相交差周波数 ω_{pc} , 268
- 位相進みコントローラ, 296
- 位相線図, 158
- 位相余裕 PM, 269
- 回転運動, 24
- 外乱, 211
- 開ループ極, 258
- 開ループ伝達関数, 256
- 可制御, 98
- 可制御性, 93
- 可制御性行列, 96
- 可制御性グラミアン, 94
- 可制御部分空間, 94
- 可到達性, 93
- 感度関数, 215
- 逆行列, 19, 54
- 共振周波数 ω_r , 171
- 共役複素数, 62
- 行列式, 19, 54
- 行列の指数関数, 72
- 極, 56
- ゲイン交差周波数 ω_{gc} , 268
- ゲイン線図, 158
- ゲイン余裕 GM, 270
- ケーリー・ハミルトンの定理, 74
- 減衰係数 ζ , 88
- 固有値, 57, 64
- 固有ベクトル, 57, 64
- 自然角周波数 ω_n , 87
- 時定数 $T > 0$, 83
- 周波数応答, 135, 143
- 周波数伝達関数, 64, 144
- 周波数特性, 135
- 出力方程式, 12
- 状態空間表現, 10, 228, 229
- 状態変数, 10
- 状態方程式, 12

- ステップ応答が有界の意味での安定性, 108
- 分子多項式, 14
- 分母多項式, 14
- 静的なシステム, 5
- 零状態応答, 79
- 零状態出力, 79
- 零点, 56
- 零入力応答, 79
- 零入力出力, 79
- 漸近安定性, 111, 127
- 線形システム, 65
- 線形性, 65
- 相補感度関数, 215
- 速応性, 285
- DC モータ, 26
- ディケード, dec, 159
- 定常特性, 288
- デシベル, dB, 158
- 伝達関数, 14, 47, 57, 227, 228
- 伝達関数の位相 $\angle G(j\omega)$, 144
- 伝達関数のゲイン $|G(j\omega)|$, 144
- 動的なシステム, 5
- 特性多項式, 235
- 特性変動, 210
- ナイキスト軌跡, 64, 262
- ナイキストの安定判別法, 262
- バネ系, 5
- バンド幅 ω_{bw} , 169
- ピークゲイン M_p , 171
- 比例コントローラ, 291
- フィードバック制御系, 206
- フィードバック制御系の漸近安定性, 239
- フィードバック制御系の有界入力有界出力安定性, 232
- フィードフォワード制御系, 206
- 複素数の絶対値, 62
- 複素数の偏角, 62
- ブロック線図, 8
- 閉ループ極, 235, 258
- ベクトル軌跡, 64, 157
- 偏角の原理, 259
- ボード線図, 157
- マス系, 6
- マス - バネ - ダンパ系, 8
- モデル化誤差, 210
- 有界入力有界出力安定性, 106, 117, 127
- 有理伝達関数, 108
- 余因子行列, 19, 54
- ラプラス変換, 39
- ループ整形法, 290

第1章 はじめに

はじめに

--
