

Engenharia de controle
Teoria e prática

Takashi Yoneyama

CONSELHO EDITORIAL

André Costa e Silva

Cecilia Consolo

Dijon de Moraes

Jarbas Vargas Nascimento

Luis Barbosa Cortez

Marco Aurélio Cremasco

Rogério Lerner

Takashi Yoneyama

ENGENHARIA DE CONTROLE
Teoria e prática

Engenharia de controle: teoria e prática

© 2022 Takashi Yoneyama

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenação editorial Jonas Eliakim

Produção editorial Aline Fernandes

Diagramação Autor

Revisão de texto Maurício Katayama

Capa Laércio Flenic

Imagem da capa iStockphoto

Editora Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

CEP 04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, março de 2009. É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Yoneyama, Takashi

Engenharia de controle : teoria e prática / Takashi Yoneyama. – São Paulo : Blucher, 2022.

413 p.: il.

ISBN 978-65-5550-227-5 (impresso)

ISBN 978-65-5550-223-7 (eletrônico)

1. Engenharia 2. Controle automático 3. Máquinas automáticas 4. Automação industrial I. Título

22-5438

CDD 629.8

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia de controle

Ao Prof. Wladimir Borgest
pelos valiosos ensinamentos
sobre Sistemas e Controle.

Conteúdo

I	Introdução	7
1	Conceitos e definições	9
1.1	Conceitos, definições e notação	9
1.2	Um exemplo intuitivo de projeto	12
1.3	Público-alvo	16
1.4	Exercícios	17
2	Panorama histórico	19
2.1	IFAC	33
2.2	Livros-textos pioneiros	34
2.3	Controle no Brasil	35
2.4	Medalhistas IEEE	37
2.5	Exercícios	38
II	Modelos de sistemas dinâmicos	39
3	Modelos dinâmicos	41
3.1	Modelos de tempo contínuo	43
3.2	Modelagem usando leis físicas	46
3.3	Validação de modelos	59
3.4	Incertezas em modelos	59
3.5	Solução de EDOs lineares	60
3.6	Método da média (<i>averaging</i>)	68
3.7	Linearização	72
3.8	Estabilidade de sistemas LTI	78
3.9	Controlabilidade	80
3.10	Observabilidade	83
3.11	Simulação de sistemas dinâmicos	89
3.12	Sistemas de segunda ordem	98

3.13	Resposta em frequência	106
3.14	Realizações simples	113
3.15	Exercícios	123
4	Modelos de tempo discreto	139
4.1	Equações a diferenças	139
4.2	Transformadas Z	145
4.3	Modelo no domínio z	147
4.4	Transformada inversa de Z	148
4.5	Alguns textos históricos	149
4.6	Exercícios	149
5	Identificação de modelos	153
5.1	Métodos elementares	153
5.2	Identificação de modelos de tempo discreto	154
5.3	Identificação pelo método do subespaço	163
5.4	Algumas notas históricas	165
5.5	Exercícios	167
III	Estabilidade	171
6	CrITÉRIOS de estabilidade para modelos LTI	173
6.1	BIBO - Estabilidade	185
6.2	Algumas personalidades ilustres	186
6.3	Exercícios	187
7	MÉTODOS de Lyapunov	193
7.1	Primeiro método de Lyapunov	193
7.2	Segundo método de Lyapunov	195
7.3	Identificação de modelos de tempo contínuo	202
7.4	<i>Backstepping</i>	209
7.5	Observações Complementares	218
7.6	Observações sobre pontos de equilíbrio	219
7.7	Notas históricas sobre o critério de Lyapunov	219
7.8	Exercícios	221
8	MÉTODOS no domínio transformado	225
8.1	Vantagens do controle em malha fechada	225
8.2	Compromissos entre requisitos	230
8.3	Controladores liga-desliga	234
8.4	Controladores no domínio transformado	245

8.5	Lugar geométrico das raízes (LGR)	250
8.6	Controlador PID	259
8.7	Escalonamento de ganhos	271
8.8	Controladores cascata	274
8.9	Compensadores avançadores/atrasadores de fase	278
8.10	Curvas de terceira ordem	288
8.11	Otimização de controladores	291
8.12	Exercícios	303
9	Métodos no Domínio do Tempo	311
9.1	Realimentação de estado	311
9.2	Observador de estados	319
9.3	Observadores de ordem reduzida	320
9.4	Filtro de Kalman: tempo contínuo	321
9.5	Observador de Perturbações	323
9.6	Observadores de estado: tempo discreto	324
9.7	Filtro de Kalman: tempo discreto	325
9.8	Regulador linear quadrático (LQR)	329
9.9	Margens de ganho e fase do controlador LQR	332
9.10	Método LQG/LTR	334
9.11	Desigualdades matriciais lineares (LMI)	338
9.12	Algumas personalidades ilustres	347
9.13	Exercícios	348
10	Controle por computador	353
10.1	Amostrador-segurador	354
10.2	Discretização de modelos de tempo contínuo	355
10.3	Escolha do período de amostragem	365
10.4	Erros de Quantização	366
10.5	Vantagens do controle por computador	367
10.6	<i>Script</i> típico de controlador	370
10.7	Mini-histórico de DDC	370
10.8	Exercícios	371
IV	Métodos adicionais	375
11	Alguns Métodos Adicionais	377
11.1	Linearização via realimentação de estados	378
11.2	Linearização por realimentação da saída	384
11.3	Controle utilizando movimentos deslizantes	388

11.4 Controle adaptativo	394
11.5 Controle baseado em planicidade	401
11.6 Controle preditivo MPC	407
11.7 Controladores inteligentes	410
11.8 Algumas personalidades famosas	415
11.9 Exercícios	417

V Uma visão sistêmica de projeto 427

12 Alguns aspectos relevantes em projetos 429

12.1 Coleta de Informações	430
12.2 Estudo do processo a ser controlado	430
12.3 Definição dos objetivos	431
12.4 Caracterização das restrições	432
12.5 Especificação dos requisitos	432
12.6 Revisão crítica	433
12.7 Modelagem matemática	433
12.8 Escolha do Enfoque	434
12.9 Seleção de componentes	435
12.10 Ajuste dos parâmetros	440
12.11 Simulações e testes	440
12.12 Documentação	441
12.13 Implementação	441
12.14 Entrega	442
12.15 Sintonização fina e otimização	442
12.16 Operação assistida	443
12.17 Manutenção	443
12.18 Desativação	444
12.19 Mitigação do efeito de falhas	444
12.20 Condições operacionais de sistemas de controle	448
12.21 Comentários	449
12.22 Exercícios	450

VI Apêndices 453

13 Apêndices 455

13.1 Apêndice A - Equação de Euler-Lagrange	455
13.2 Apêndice B - Iteração de Picard	459
13.3 Apêndice C - Exponencial de matriz	462

13.4	Apêndice D - Estabilidade de sistemas LTI	469
13.5	Apêndice E - Equação de Hamilton-Jacobi-Bellman	478
13.6	Apêndice F - Lema de Barbalat	481
13.7	Apêndice G - Linearização harmônica	484
13.8	Apêndice H - Margens de estabilidade LQR/MIMO	497
13.9	Apêndice I - Dinâmica zero	501
13.10	Apêndice J - Não linearidades setoriais	504
13.11	Apêndice K - Otimização numérica	509
