Entwurf robuster Regelungen

Von Dr.-Ing. Kai Müller
Akademischer Rat am Institut
für Regelungstechnik der
Technischen Universität Braunschweig

Mit 97 Bildern und 2 Tabellen

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 1996

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Müller, Kai:

Entwurf robuster Regelungen : mit 2 Tabellen / von Kai
Müller.

ISBN 978-3-519-06173-1

ISBN 978-3-663-12091-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-12091-9

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1996

Ursprünglich erschienen bei B.G. Teubner Stuttgart 1996

Vorwort

In Abständen von etwa 20 Jahren konnten in der Regelungstechnik grundsätzliche Neuerungen beobachtet werden. Nachdem in den 40er Jahren eine systematische Behandlung von Regelkreisen im Frequenzbereich entwickelt wurde (Bode, Nyquist, Ziegler und Nichols, Wiener), verlagerte sich um 1960 das Interesse der Theoretiker auf den Zeitbereich, den Zustandsraum und optimale Regelung (Luenberger, Kalman). Die Verfahren basieren auf Prozeßmodellen, und es stellte sich heraus, daß häufig in der praktischen Anwendung Probleme aufgrund von Modell- oder Parameterunsicherheiten auftreten. Dies motivierte die Entwicklung der robusten Regelungen in den 80er Jahren, die explizit bei Anwesenheit von Unsicherheiten Stabilität bzw. die Einhaltung bestimmter Qualitätsmerkmale gewährleisten ([16], [17], [68]) und somit große praktische Relevanz aufweisen.

In diesem Buch sollen Theorie und Einsatz der in den 80er Jahren entwickelten Norm-optimalen Regelungen vermittelt werden. Selbstverständlich handelt es sich hierbei nur um eine Facette der zahlreichen neuen Entwicklungen auf dem Gebiet der Entwurfs- und Analyseverfahren. Insbesondere die H_∞ -optimalen Regler und die μ -Synthese haben jedoch in den letzten 10 Jahren entscheidend dazu beigetragen, daß sich das Bild der "modernen" Regelungstechnik merklich gewandelt hat.

Obwohl die Norm-optimalen Regelungen einen neuen Ansatz darstellen, so ist doch die Entwicklung ohne die Ergebnisse früherer Verfahren undenkbar. Aus didaktischen Gründen werden deshalb den robusten Regelungen Verfahren wie Polvorgabe, quadratisch optimale Regelung oder LQG vorangestellt.

In Kapitel 7 schließt sich eine Einführung in Normen für Signale und Systeme an. Die Entwicklung der koprimen Faktorisierung und der Reglerparametrierung (Kapitel 8) ist sowohl ein eigenständiges, universelles Entwurfsverfahren als auch die historische Grundlage für die 2- und ∞ -Norm-optimalen Regelungen (Kapitel 9, 10 und 11). Die Theorie wird vollständig am Beispiel von Eingrößentrecken hergeleitet. Im 12. Kapitel erfolgt die Verallgemeinerung auf Mehrgrößensysteme im Zustandsraum. Ein Mehrgrößenproblem entsteht auch bei Eingrößentrecken, wenn mehrere Anforderungen zu berücksichtigen sind.

Es wurden konsequent die in der internationalen Literatur üblichen Bezeichnungen verwendet. Dabei wurde bewußt in Kauf genommen, daß Symbole in verschiedenen Kapiteln unterschiedliche Bedeutung tragen können. So hat beispielsweise Q in Kapitel 5 über optimale Regelungen die Bedeutung einer Gewichtsmatrix, während in Kapitel 8 über kopprime Faktorisierung $Q(s)$ die Übertragungsfunktion für die Regler-Parametrierung ist.

Die bisherigen Ergebnisse werden im letzten Kapitel verwendet, um ∞ -Norm-optimale Regler für unstrukturierte Unsicherheiten zu entwerfen. Mit der Einführung des strukturierten singulären Wertes μ wird gezeigt, wie Parameterunsicherheiten berücksichtigt werden können und sich ein systematischer Reglerentwurf durchführen läßt, der Regelqualität bei Anwesenheit von Unsicherheiten gewährleistet.

Auch wenn für viele Anwendungen der Aufwand für den Entwurf robuster Regelungen zu hoch erscheint, so gibt der Umgang mit diesen Verfahren doch darüber Aufschluß, welche Ergebnisse mit modernen Verfahren erreichbar sind.

Mein Dank gilt Marcus Brand und Kai Michels von der Technischen Universität Braunschweig sowie Dr. John Chiasson von der University of Pittsburgh für fachliche und menschliche Unterstützung.

Braunschweig, Dezember 1995

Kai Müller
(E-Mail: mueller@ifr.ing.tu-bs.de)

Inhalt

1	Regelungstechnische Grundlagen	1
1.1	Die Begriffe der Regelungstechnik nach DIN 19226 und DIN 19229	1
1.1.1	Reglertypen nach DIN	2
1.2	In der Regelungstheorie gebräuchliche Bezeichnungen	6
1.3	Ein- und Mehrgrößensysteme	6
1.4	Grundlegende Beziehungen des geschlossenen Kreises	8
1.5	Berücksichtigung von Modellunsicherheiten	11
1.6	Motivierende Einführung: Die Youla-Parametrierung für stabile Strecken	15
1.6.1	Beispiel für den Eingrößenfall	17
1.7	Übungsbeispiel: Youla-Parametrierung	18
1.7.1	Lösung	18
2	Übertragungsfunktion und Zustandsdarstellung	21
2.1	Zustandsgrößen	22
2.1.1	Regelungs-Normalform	22
2.1.2	Zustandsgleichung und Ausgangsgleichung	25
2.1.3	Physikalisches Beispiel: Schwingkreis	26
2.2	Laplace-Transformation der Zustandsgleichungen	27
2.2.1	Berechnung einer Übertragungsfunktion aus der Zustandsdarstellung	29
2.3	Basistransformation im Zustandsraum	30
2.4	Beobachter-Normalform	31
2.5	Übungsbeispiel: Zustandsdarstellung einer mechanischen Strecke	34

2.5.1	Lösung	34
3	Zustandsregelung	38
3.1	Polvorgabe mit einem Zustandsregler	39
3.2	Struktur von $(sI - A)^{-1}$, Leverrier-Algorithmus	40
3.3	Berechnung des Polvorgabe-Reglers (Zustandsregelung)	41
3.3.1	Beispiel für ein nicht steuerbares System	45
3.4	Polvorgabe bei Regelungs-Normalform	47
3.5	Zustandsregler für Führungsverhalten	48
3.5.1	Zustandsrealisierung des geschlossenen Kreises	50
3.6	Übungsbeispiel: Polvorgabe	51
3.6.1	Lösung	52
3.7	CAD-Übung: Zustandsreglerentwurf (MATLAB-Software erforderlich)	55
3.7.1	MATLAB M-Files	57
3.7.2	Ergebnisse	59
4	Beobachter	64
4.1	Der Entwurf des Luenberger-Beobachters	66
4.2	Zustandsregelung mit Beobachter	68
4.2.1	Bestimmung des Reglers	70
4.3	Übungsbeispiel: Zustandsregelung mit Beobachter	71
4.3.1	Lösung	72
5	Optimale Zustandsregelung	75
5.1	Berechnung der optimalen Stellgröße $u(t)$	77
5.2	Zusammenfassung der Lösung	81
5.3	Beispiel für eine optimale Zustandsregelung	82
5.4	Bewertung der Ausgangsgröße y anstelle der Zustandsgröße x	83

5.5	Übungsbeispiel: LQR (Linear Quadratic Regulator)	84
5.5.1	Lösung	84
6	Kalman-Filter und LQG	88
6.1	Berechnung des Kalman-Filters	90
6.2	LQG (Linear Quadratic Gaussian)	92
6.2.1	Berechnung des Reglers nach dem LQG-Verfahren ...	93
6.3	CAD-Übung: Kalman-Filter (MATLAB-Software erforderlich)	95
6.3.1	MATLAB M-Files	96
6.3.2	Ergebnisse	98
7	Normen für Signale und Systeme	101
7.1	Eigenschaften von Normen	101
7.2	Normen für Signale	101
7.2.1	Endlichkeit von Normen für Signale	103
7.3	Normen für Systeme	105
7.3.1	Endlichkeit von Normen für Systeme	107
7.3.2	Berechnung der 2-Norm	108
7.3.3	Berechnung der ∞ -Norm	109
7.4	Eingangs-/Ausgangsbeziehungen	110
7.5	Übungsbeispiel: Berechnung der Normen von Systemen	116
7.5.1	Lösung	116
8	Koprime Faktorisierung	119
8.1	Berechnung von $X(s)$ und $Y(s)$ mit dem Algorithmus von Euklid	120
8.2	Beispiel: koprime Faktorisierung einer instabilen Strecke	122
8.3	Q-Parametrierung: der allgemeine Fall	124
8.3.1	Interne Stabilität	124

8.4	Die Menge aller G stabilisierenden Regler	126
8.4.1	Herleitung der internen Stabilität für den geschlossenen Kreis mit dem parametrierten Regler	126
8.5	Entwurf eines stabilisierenden Reglers mit vorgebbaren Eigenschaften durch kopprime Faktorisierung	128
8.5.1	Algorithmus	128
8.6	Übungsbeispiel: Reglerentwurf für eine instabile Strecke durch kopprime Faktorisierung	129
8.6.1	Lösung	130
9	Modellabgleich	134
9.1	Problemstellung	134
9.1.1	Beispiel für minimale ∞ -Norm bei einer Nullstelle von $U(s)$ in der rechten Halbebene	137
10	Minimierung der 2-Norm	138
10.1	Definition der Mengen φ_0 und $\varphi_0^\perp$	138
10.2	Berechnung des 2-Norm-optimalen $Q(s)$	140
10.3	Beispiel für eine 2-Norm-optimale Regelung	142
10.4	Übungsbeispiel: 2-Norm-optimale Regelung für eine instabile Strecke	145
10.4.1	Lösung	146
11	Minimierung der ∞-Norm	149
11.1	Nevannlinna-Pick-Interpolation	149
11.1.1	NP für ein Wertepaar a_1, b_1	150
11.1.2	Beispiel für NP	152
11.1.3	NP für n Punkte	153
11.1.4	Beispiel: NP für 2 Wertepaare	154
11.2	Lösung des Modellabgleich-Problems für $\ T-UQ\ _\infty$ durch NP	155

11.2.1	Algorithmus zur Berechnung $Q(s)$ für $\min \ T-UQ\ _\infty$	157
11.3	Übungsbeispiel: ∞ -Norm-optimale Regelung einer instabilen Strecke	158
11.3.1	Lösung gemäß Kap. 11.2.1	159
12	Berechnung 2- und ∞-Norm-optimaler Regler im Zustandsraum (H2-/H∞-optimale Regler)	163
12.1	Berechnung der 2-Norm von Mehrgrößenstrecken	165
12.2	Berechnung der ∞ -Norm von Mehrgrößenstrecken	167
12.3	Berechnung Norm-optimaler Regler im Zustandsraum	170
12.3.1	Beispiel: PT ₁ -Strecke mit proportionalen Gewichtsfunktionen W_1 und W_2	172
12.3.2	Struktur des Blocks P	173
12.4	Berechnung des 2-Norm-optimalen Reglers	174
12.4.1	Beispiel für eine 2-Norm-optimale Regelung mit dynamischer Stellgrößenbeschränkung	175
12.5	Bedingungen für die Existenz von Lösungen für den 2-Norm-Entwurf	178
12.6	Berechnung des optimalen Reglers	179
12.7	Beispiel für eine ∞ -Norm-optimale Regelung	181
12.8	Bedingungen für die Existenz von Lösungen für den ∞ -Norm-Entwurf	184
13	Reglerentwurf für Prozesse mit unsicheren Parametern und unstrukturierten Modellunsicherheiten	186
13.1	Reglerentwurf für Prozesse mit unstrukturierter Modellunsicherheit	188
13.1.1	Beispiel: Entwurf eines Reglers für robuste Stabilität	190
13.2	Der strukturierte singuläre Wert μ (SSV)	192
13.2.1	Definition von μ	192
13.2.2	Berechnung von μ	194

13.3	Analyse der robusten Stabilität bei strukturierter Modellunsicherheit	195
13.3.1	Beispiel: Prüfmaschine	196
13.4	Entwurf von Reglern für robuste Regelqualität (RP)	199
13.4.1	Main-Loop-Theorem	199
13.4.2	Analyse robuster Regelqualität	200
13.4.3	Berechnung von Reglern für RP	202
13.4.4	Beispiel: Optimierung der robusten Regelqualität	206
13.4.5	MATLAB-Befehle zum Beispiel 13.4.4 (Entwurf eines Regles für robuste Regelqualität)	213
Literaturverzeichnis		217
Mathematischer Anhang		223
A	Matrizenrechnung	223
A.1	Rechenregeln für Transposition und Inversion	223
A.1	Rechenregeln für Determinanten	223
A.2	Matrix-Analysis	223
B	Rechenregeln für Zustandsdarstellungen	224
B.1	Basistransformation der Zustandsgrößen	224
B.2	Inversion	224
B.3	Konjugiert komplexe Transposition	224
B.4	Parallelschaltung	225
B.5	Addition	225
B.6	Multiplikation	225
B.7	Rückkopplung I ($D_1 = [0]$)	226
B.8	Rückkopplung II ($D_1 = [0]$)	226
Sachverzeichnis		227