

Optimale Regelung und Steuerung

von

Professor em. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. Otto Föllinger

Universität Karlsruhe

unter Mitwirkung von

Dr.-Ing. habil. Günter Roppenecker

3., verbesserte Auflage

Mit 96 Bildern, 7 Tabellen und
16 Übungsaufgaben mit genauer
Darstellung des Lösungsweges

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1994

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Einführung	11
1 Die Strukturoptimierung dynamischer Systeme als Variationsproblem	21
1.1 Parameteroptimierung und Strukturoptimierung	21
1.2 Gütemaße	29
1.3 Formulierung des Optimierungsproblems.	38
1.4 Grundsätzlicher Aufbau einer optimalen Regelung	43
2 Allgemeine Lösung des Optimierungsproblems	49
2.1 Vorbereitung: Lösung des Grundproblems der Variationsrechnung	49
2.2 Mathematische Vorbemerkung: Differentiation von Vektorfunktionen	57
2.3 Herleitung der Hamilton-Gleichungen und der Transversalitätsbedingung des Optimierungsproblems.	60
2.3.1 Erweiterung der Problemstellung	60
2.3.2 Anwendung Lagrangescher Multiplikatoren	63
2.3.3 Verwendung von Vergleichskurven	65
2.3.4 Herleitung der Transversalitätsbedingung	70
2.3.5 Zusammenstellung der Ergebnisse.	72
2.4 Grundsätzlicher Lösungsweg für das Randwertproblem der Hamilton-Gleichungen	76
2.5 Beispiel zur Illustration des grundsätzlichen Lösungsweges.	79
2.6 Grenzen der klassischen Lösungsmethode	84

3	Optimierung linearer Systeme mit quadratischem Gütemaß . . .	89
3.1	Mathematische Vorbemerkung: Nochmals Differentiation von Vektorfunktionen.	89
3.2	Formulierung der Aufgabe.	92
3.3	Bestimmung des optimalen Regelungsgesetzes aus der Riccati-Gleichung	96
3.4	Lösung der Riccati-Gleichung	102
3.4.1	Struktur der Lösung	102
3.4.2	Numerische Lösung am Beispiel 2. Ordnung	106
3.4.3	Allgemeine Lösung der Riccati-Gleichung	113
3.4.4	Lösung der Riccati-Gleichung bei zeitinvariantem Problem und endlichem Steuerintervall: Verfahren nach K ALM AN und ENGLAR	116
3.5	Bestimmung des optimalen Regelungsgesetzes bei zeitinvariantem Problem und unendlichem Steuerintervall mittels der Hamilton-Gleichungen.	119
4	Das Maximumprinzip von Pontrjagin.	131
4.1	Plausibilität des Maximumprinzips.	131
4.2	Formulierung des Maximumprinzips.	137
4.3	Anmerkungen zum Maximumprinzip.	142
5	Entwurf zeitoptimaler Systeme.	149
5.1	Die zeitoptimale Steuerfunktion	149
5.2	Der Satz von Feldbaum (Satz von den n Schaltintervallen).	159
5.3	Berechnung der Schaltzeitpunkte	164
5.4	Ermittlung des zeitoptimalen Regelungsgesetzes für Systeme 2. Ordnung mit reellen Eigenwerten.	167
5.5	Suboptimale Regelungen	176
5.6	Entwurf zeitoptimaler Regelungen mit nichtreellen Eigenwerten. . . .	186
6	Weitere Anwendungen des Maximumprinzips.	195
6.1	Treibstoffoptimales Problem	195
6.1.1	Problemstellung	195
6.1.2	Anwendung des Maximumprinzips.	198
6.1.3	Singulärer Fall.	201
6.1.4	Optimale Steuerfunktion.	204
6.1.5	Optimales Regelungsgesetz.	207

6.2	Steuerungsproblem mit nichtlinearer Strecke: Optimierung einer Werbestrategie	214
6.2.1	Problemstellung	214
6.2.2	Anwendung des Maximumprinzips.	217
6.2.3	Anzahl der Umschaltungen.	220
6.2.4	Optimale Steuerfunktion	224
6.2.5	Singulärer Fall.	228
6.2.6	Zahlenbeispiel	232
7	Die dynamische Programmierung von Bellman.	237
7.1	Einführendes Beispiel: Auffinden eines optimalen Pfades in einem Wegenetz	237
7.2	Das Bellmansche Optimalitätsprinzip.	245
7.3	Die Bellmansche Rekursionsformel.	254
7.4	Grundsätzliche Auswertung der Bellmanschen Rekursionsformel und Abschätzung des Rechenaufwands.	259
7.5	Anwendung der dynamischen Programmierung zur Optimierung von Abtastsystemen	265
7.6	Die Bellmansche Funktionalgleichung und der Zusammenhang mit dem Maximumprinzip.	271
	Übungsaufgaben mit Lösungen.	281
	Bücher zum Thema.	381
	Stichwortverzeichnis.	391