

Inhaltsverzeichnis

I Vorbereitung

1	Motivationsbeispiele	3
1.1	Mobiler Roboter	4
1.2	Wagen mit Pendel	6
1.3	Hochsetzsteller	8
	Literatur	9
2	Mathematische Grundlagen	11
2.1	Lineare Algebra	12
2.2	Felder und Ableitungen	17
2.3	Vektorfelder und Flüsse	23
2.4	Übungsaufgaben	39
2.5	Lösungen	39
	Literatur	41
3	Differentialgeometrische Begriffe	43
3.1	Differentialoperatoren	44
3.1.1	Lie-Ableitung eines Skalarfeldes	44
3.1.2	Pushforward und Pullback eines Vektorfeldes	50
3.1.3	Lie-Ableitung eines Vektorfeldes	55
3.1.4	Pullback und Lie-Ableitung eines Kovektorfeldes	63
3.2	Lie-Klammern und dynamische Systeme	68
3.3	Distributionen und Kodistributionen	76
3.4	Involutive Distributionen	83
3.5	Differentialformen	95
3.6	Übungsaufgaben	104
3.7	Lösungen	105
	Literatur	108

II Reglerentwurf

4	Reglerentwurf mittels exakter Linearisierung	113
4.1	Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung für eingangsaффine Systeme	115
4.1.1	Relativer Grad und grundsätzliches Vorgehen	115
4.1.2	Byrnes-Isidori-Normalform	125
4.1.3	Reglerentwurf zur Stabilisierung einer Ruhelage	135
4.1.4	Nulldynamik	140
4.1.5	Äquivalenz von Systemen und globale Stabilisierung	146
4.2	Exakte Eingangs-Zustands-Linearisierung	149

4.2.1	Problemformulierung	149
4.2.2	Problemlösung über Distributionen	151
4.2.3	Problemlösung über Differentialformen	159
4.2.4	Maximaler relativer Grad	163
4.3	Exakte Linearisierung für nicht eingangsaffine Systeme	168
4.3.1	Relativer Grad und Eingangs-Ausgangs-Normalform	168
4.3.2	Byrnes-Isidori-Normalform	176
4.3.3	Eingangs-Zustands-Linearisierung und Regelungsnormalform	182
4.4	Flache Systeme	185
4.4.1	Definition und Einführungsbeispiele	185
4.4.2	Zusammenhang zwischen flachem Ausgang und Systemausgang für Eingrößensysteme	188
4.4.3	Verallgemeinerte Regelungsnormalform	191
4.5	Mehrvariable Systeme	194
4.5.1	Vektorieller relativer Grad	194
4.5.2	Dynamische Erweiterung	200
4.5.3	Quasi-statische Rückführungen	206
4.6	Beispiel: Hochsetzsteller	210
4.6.1	Gemittelttes Modell und Ruhelagen	210
4.6.2	Eingangs-Ausgangs-Linearisierung bezüglich einer Referenzspannung	211
4.6.3	Eingangs-Ausgangs-Linearisierung bezüglich eines Referenzstroms	213
4.6.4	Eingangs-Zustands-Linearisierung	214
4.6.5	Numerische Simulation	215
	Literatur	217
5	Erweiterte Regelungskonzepte auf Basis der exakten Linearisierung	223
5.1	Trajektorienfolgeregelung mittels Rückführung (Feedback)	225
5.1.1	Ausgangsfolgeregelung	225
5.1.2	Überführung zwischen Ruhelagen	230
5.2	Trajektorienfolgeregelung mittels Aufschaltung (Feedforward)	233
5.2.1	Folgeregelung entlang einer bekannten Referenztrajektorie	233
5.2.2	Berechnung der Referenztrajektorie bei vollem relativen Grad	235
5.2.3	Berechnung der Referenztrajektorie bei nicht vollem relativen Grad	237
5.3	Modellbasierte Regelung (IMC)	239
5.3.1	Modellbasierte Regelung für lineare Systeme	240
5.3.2	Modellbasierte Regelung für nichtlineare minimalphasige Systeme	243
5.3.3	Modellbasierte Regelung für nichtlineare maximalphasige Systeme	245
5.4	Approximative Linearisierung durch Modifikation	250
5.5	Approximative Linearisierung durch Reihenentwicklung	253
5.5.1	Vorüberlegungen und exakte Linearisierung	254
5.5.2	Approximation nullter Ordnung	257
5.5.3	Approximation erster Ordnung	258
5.5.4	Approximation zweiter Ordnung	260
5.6	Modifizierte optimale Regelung	261
5.6.1	Optimale Regelung	262

Inhaltsverzeichnis

5.6.2	Sontag-Formel	267
	Literatur	270

III Beobachterentwurf

6	Beobachter mit großer Verstärkung und starke Beobachter	277
6.1	Beobachterentwurf in Originalkoordinaten	278
6.1.1	High-Gain-Entwurf für unstrukturierte nichtlineare Systeme	279
6.1.2	High-Gain-Entwurf für strukturierte nichtlineare Systeme	282
6.2	Beobachterentwurf auf Basis der Beobachtbarkeitsnormalform	285
6.2.1	Nichtunterscheidbarkeit und Beobachtbarkeit für autonome Systeme	285
6.2.2	Beobachterentwurf für autonome Systeme	289
6.2.3	Beobachtbarkeit und Beobachterentwurf für eingangsabhängige Systeme	296
6.3	Beobachterentwurf auf Basis der Eingangs-Ausgangs-Normalform	303
6.3.1	Struktur des Beobachters	303
6.3.2	Berechnung der Beobacherverstärkung auf Basis der Byrnes-Isidori-Normalform	305
6.3.3	Berechnung der Beobacherverstärkung mit der Moore-Penrose-Inversen	308
6.4	Beobachterentwurf bei unbekanntem Eingang	310
	Literatur	314
7	Beobachterentwurf mittels exakter bzw. näherungsweiser Linearisierung der Fehlerdynamik	319
7.1	Linearisierung des Beobachtungsfehlers durch Aufschaltung	320
7.2	Normalform-Beobachter	322
7.2.1	Beobachter-Struktur	322
7.2.2	Reduzierter Normalform-Beobachter	325
7.3	Existenz und Berechnung der Beobachternormalform	327
7.3.1	Existenz und Berechnung der Normalform nach Byrnes und Isidori	327
7.3.2	Existenz und Berechnung der Normalform nach Nam	339
7.3.3	Berechnung nach Keller und Phelps	342
7.3.4	Berechnung nach Li und Tao	347
7.4	Taylorapproximation	350
7.4.1	Approximation nullter Ordnung mit einem High-Gain-Beobachter	350
7.4.2	Approximation erster Ordnung mit einem erweiterten Luenberger-Beobachter	355
7.4.3	Approximation höherer Ordnung	361
	Literatur	364
	Serviceteil	369
	Anhang A Stabilität	371
A.1	Stabilität autonomer Systeme	371
A.2	Stabilität erregter Systeme	375

A.3	Stabilität im geschlossenen Regelkreis	377
	Literatur	379
	Symbolverzeichnis	381
	Stichwortverzeichnis	383