

Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik

Klaus Röbenack

**Regler- und Beobachterentwurf für nichtlineare
Systeme mit Hilfe des Automatischen Differenzierens**

**Shaker Verlag
Aachen 2005**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Ziele und Gliederung der Arbeit	4
2	Automatisches Differenzieren	7
2.1	Ableitungen und Methoden zu deren Berechnung	7
2.2	Vorwärtsmodus	9
2.3	Rückwärtsmodus	14
2.4	Taylorkoeffizienten	18
2.5	Jacobimatrizen	21
2.6	Zusammenfassung	25
3	Berechnung von Lie-Ableitungen in der Differentialgeometrie	27
3.1	Lie-Ableitungen von Funktionen	28
3.2	Jacobimatrizen bzw. Gradienten von Lie-Ableitungen	39
3.3	Variationsgleichung und ihre Adjungierte	45
3.4	Lie-Klammern	48
3.5	Gemischte Lie-Ableitungen	58
3.6	Lie-Ableitungen entlang mehrfacher Lie-Klammern	60
3.7	Beispiel: Manipulator	62
3.8	Zusammenfassung	70
4	Reglerentwurf mittels exakter Eingangs-Ausgangs-Linearisierung	73
4.1	Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung für Eingrößensysteme	74
4.2	Berechnung der Zustandsrückführung für Eingrößensysteme	81
4.3	Stabilisierung um eine Referenzgangstrajektorie	84
4.4	Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung für Mehrgrößensysteme	87
4.5	Berechnung der Zustandsrückführung für Mehrgrößensysteme, Variante I	92
4.6	Berechnung der Zustandsrückführung für Mehrgrößensysteme, Variante II	95
4.7	Beispiel: Doppelpendel	98
4.8	Beispiel: Spurnachführung	102
4.9	Beispiel: Radbewegung	107
4.10	Zusammenfassung	110

5 Entwurf von High-Gain-Beobachtern	113
5.1 Beobachtbarkeit	114
5.2 Beobachtbarkeitsmatrizen	116
5.3 High-Gain-Beobachter für Eingrößensysteme	121
5.4 Berechnung der High-Gain-Beobacherverstärkung für Eingrößensysteme	126
5.5 Beobachtbarkeitsindizes	130
5.6 High-Gain-Beobachter für Mehrgrößensysteme	134
5.7 Berechnung der High-Gain-Beobacherverstärkung für Mehrgrößensysteme	139
5.8 Beispiel: Chua-Schaltung	143
5.9 Beispiel: Spurnachführung	147
5.10 Zusammenfassung	151
6 Erweiterter Luenberger-Beobachter	153
6.1 Zeitvariante Ackermann-Formel	154
6.2 Normalform-Beobachter	156
6.3 Nichtlineare Ackermann-Formel	159
6.4 Berechnung der Beobacherverstärkung des erweiterten Luenberger-Beobachters für Eingrößensysteme	164
6.5 Verallgemeinerungen der Ackermann-Formel für nichtlineare Mehrgrößensysteme	170
6.6 Berechnung der Beobacherverstärkung des erweiterten Luenberger-Beobachters für Mehrgrößensysteme	174
6.7 Beispiel: Rössler-Attraktor	177
6.8 Beispiel: Rührkesselreaktor	182
6.9 Beispiel: Spurnachführung	183
6.10 Zusammenfassung	186
7 Beobachterentwurf mittels erweiterter Linearisierung	187
7.1 Beschreibung des Verfahrens	188
7.2 Berechnung der Ausgangsaufschaltung	191
7.3 Beispiel: Ball-Balken-System	196
7.4 Beispiel: Synchronmotor	200
7.5 Zusammenfassung	206
8 Berechnung von Referenzverläufen	207
8.1 Folgeregelung und Vorsteuerung	207
8.2 Berechnung der Referenztrajektorie für den Eingang, Variante I	209
8.3 Berechnung der Referenztrajektorie für den Eingang, Variante II	221
8.4 Beispiel: Ball-Balken-System	226
8.5 Beispiel: Manipulator	228
8.6 Zusammenfassung	231
9 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	233
9.1 Gegenstand und Ergebnisse der Arbeit	233
9.2 Ausblick	237

A	Ackermann-Formel und Normalform-Beobachter	239
A.1	Herleitung der Ackermann-Formel für lineare Eingrößensysteme	239
A.2	Existenzbedingungen für die nichtlineare Beobachter-Normalform	243
A.3	Ergänzungen zur Ackermann-Formel für nichtlineare Systeme	251
A.4	Zusammenhang zwischen zeitvarianter und nichtlinearer Ackermann-Formel	252
A.5	Ackermann-Formel für lineare Mehrgrößensysteme	254
B	Symbolverzeichnis	259
B.1	Allgemeine mathematische Symbole	259
B.2	Differentialoperatoren	260
B.3	Software	261
	Literaturverzeichnis	263