

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Mathematische Grundlagen	9
2.1	Die Rosenbrock-Systemmatrix	9
2.2	Rang einer Matrix	10
2.2.1	Rang von Matrizenprodukten	11
2.2.2	Term-Rang und generischer Rang	12
2.3	Smithsche Normalform einer Polynommatrix	14
2.4	Smith-McMillan-Normalform einer rationalen Matrix	16
2.5	Householder-Transformationen	19
2.6	Hessenberg-Form einer Matrix	22
2.7	Singulärwertzerlegung und Anwendungen	23
2.7.1	Norm und Konditionszahl einer Matrix	24
2.7.2	Pseudoinverse einer Matrix	26
2.7.3	Numerische Berechnung der Singulärwertzerlegung	28
2.7.4	Numerischer Rang einer Matrix	29
2.8	Kronecker-Normalform eines Matrizenbüschels	29
2.8.1	Reguläre Matrizenbüschel	30
2.8.2	Singuläre Matrizenbüschel	33
2.8.3	Numerische Bestimmung der Kronecker-Normalform	36
3	Steuerbarkeit linearer Regelungssysteme	38
3.1	Steuerbarkeitskriterien	40
3.1.1	Zustandssteuerbarkeit	40
3.1.2	Ausgangssteuerbarkeit	43
3.2	Quantitative Steuerbarkeitsanalyse	46
3.2.1	Steuerbarkeitsindizes	46
3.2.2	Abstand zum nächsten nicht steuerbaren System	49
3.2.3	Steuerbarkeitsmaße	51
3.3	Numerische Untersuchung der Zustandssteuerbarkeit	59
3.3.1	Kalman-Kriterium	60
3.3.2	Hautus-Kriterium	71
3.3.3	Rosenbrocks Eingangs-Entkopplungsnullstellen	72
3.4	Qualitative Überprüfung der Zustandssteuerbarkeit	77
3.4.1	Strukturelle Steuerbarkeit	78
3.4.2	Strenge strukturelle Steuerbarkeit	86
3.5	Numerische Untersuchung der Ausgangssteuerbarkeit	92
3.5.1	Parameterabhängige Kriterien	92
3.5.2	Parameterunabhängige Kriterien	94

4	Beobachtbarkeit linearer Regelungssysteme	97
4.1	Dualitätsprinzip	97
4.2	Kriterien der Beobachtbarkeit	98
5	Pole und Nullstellen linearer Mehrgrößensysteme	102
5.1	Pole und Nullstellen der Übertragungsmatrix	103
5.2	Pole und Nullstellen der Rosenbrock-Systemmatrix	107
5.3	Eigenschaften der endlichen Nullstellen	116
5.4	Anzahl der endlichen Nullstellen eines linearen Systems	119
5.5	Physikalische Interpretation der Pole und Nullstellen	123
5.6	Praktische Bedeutung der endlichen Nullstellen	126
5.7	Numerische Berechnung der endlichen Nullstellen	127
5.7.1	Verfahren von Davison und Wang	128
5.7.2	Verfahren von Lub und Moore	129
5.7.3	Algorithmus ZEROS von Emami-Naeini und Van Dooren	133
5.7.4	Parameterunabhängige Abschätzung der Anzahl der Nullstellen	142
5.7.5	Berechnung für Großsysteme	146
6	Nullstellen linearer Systeme im Unendlichen	153
6.1	Nullstellen im Unendlichen der Übertragungsmatrix	154
6.2	Nullstellen im Unendlichen der Rosenbrock-Matrix	155
6.3	Eine abstrakte allgemeingültigere Definition	159
6.4	Beziehungen zwischen den Nullstellendefinitionen im Unendlichen	162
6.5	Bestimmung der Nullstellenstruktur im Unendlichen	165
6.5.1	Bestimmung mit Hilfe der Bewertungstheorie	166
6.5.2	Bestimmung anhand der Smith-McMillan-Form im Unendlichen	170
6.5.3	Bestimmung mittels Toeplitz-Matrizen	174
6.6	Eigenschaften der Nullstellen im Unendlichen	177
6.7	Anzahl der Nullstellen im Unendlichen	182
6.8	Praktische Bedeutung der Nullstellen im Unendlichen	183
6.8.1	Ein-/Ausgangsentkopplung durch Zustandsrückführung	184
6.8.2	Das exakte dynamische Modellfolgeproblem	190
6.8.3	Das Störungs-Entkopplungsproblem	192
6.8.4	Das Wurzelortskurvenverfahren für Mehrgrößensysteme	195
6.9	Numerische Berechnung der Nullstellen im Unendlichen	199
6.9.1	Der erweiterte Algorithmus ZEROS	201
6.10	Bestimmung der generischen Struktur im Unendlichen	206
6.10.1	Bestimmung mit Hilfe der Bewertungstheorie	206
6.10.2	Bestimmung mittels Toeplitz-Matrizen	211
7	Abschließende Bemerkungen	218

8 Literatur	219
Wichtige Formelzeichen und Abkürzungen	238
Algorithmenverzeichnis	241
Stichwortverzeichnis	242