

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Forschung und konkrete Ziele der Arbeit	4
2.1 Realisierungen modellgestützter Regler für Industrieroboter	5
2.2 Modellierung	6
2.2.1 Modellordnung und -struktur	7
2.2.2 Modellidentifikation	7
2.3 Modellgestützte Reglerarchitektur	9
2.3.1 Stabile, modellfehlerrobuste Roboterregelung	10
2.4 Modell-adaptive Regelung	11
2.4.1 Garantiert stabile modell-adaptive Regelung	13
2.5 Auswahl des Prinzips zur Modelladaptation	13
2.6 Modellgestützte Regelung bei Elastizitäten, Lose und Reibung	14
2.6.1 Elastizitäten und Lose	14
2.6.2 Modellgestützte Reibungskompensation	15
3 Theorie der Modellbildung und modellgestützten Roboterregelung	16
3.1 Definitionen	16
3.1.1 Maße	16
3.1.2 Input-Output-Stabilität	18
3.2 Optimierung linear parametrisierter Modelle	19
3.2.1 Fundamentale Beziehungen bei linear parametrisierten Modellen . .	19
3.2.2 Methoden zur globalen und schrittweisen Fehlerminimierung	21
3.3 Dynamik von Mehrgelenkrobotern	22
3.3.1 Allgemeine Struktur und Symmetrien der Bewegungsgleichungen . .	23
3.3.2 Starrkörperdynamik eines Roboters	25
3.3.3 Konkrete Form der Modellgleichungen und Modellparametrisierung	25
3.3.4 Vereinfachte Dynamikgleichungen bei elastischen Antriebssträngen .	26

3.3.5	Modelle der Reibung	27
3.4	Konventionelle Roboterregelung	29
3.4.1	Kaskadenregler	30
3.4.2	Konventionelle Regelung einer Achse mit Elastizität	31
3.5	Architekturen zum Training und Einsatz modellgestützter Regler	33
3.5.1	Wahl der Modellordnung und Modelleingangsgrößen	33
3.5.2	Off-line-Modellidentifikation	34
3.5.3	Regelung mit nichtlinearer Systementkopplung	36
3.5.4	Ljapunov-stabile, modell-adaptive Regelung	38
3.5.5	Modellgestützte Regelung bei Antriebselastizitäten	39
3.6	Funktionalanalytische Methode zum Entwurf stabiler, modellfehlerrobuster Roboterregelungen	40
3.6.1	Normabschätzung der nichtlinearen Störgröße	40
3.6.2	Vertiefungen und Erweiterungen der Robustheitsanalyse	44
3.6.3	Auswahl geeigneter Parameter von robusten PID-Reglern	46
4	Neuronale Netze zur Modellierung mittels verrauschter Daten	49
4.1	Vorwärtsgekoppelte neuronale Netze	50
4.1.1	Struktur von Multilayer-Perceptrons	51
4.1.2	Andere zur Modellierung gebräuchliche Netztypen	53
4.1.3	Kriterien zur Auswahl des Netztyps	56
4.2	Training der neuronalen Netze mittels verrauschter Beispieldaten	57
4.2.1	Anwendung verschiedener Fehlerminimierungsverfahren	57
4.2.2	Gradientenabstieg in kleinen Schritten	58
4.2.3	Stochastisches Einzelschrittlernen	61
4.2.4	Verrauschte Trainingsdaten zur Prozeßmodellierung	63
4.2.5	Anwendungen von Error-Backpropagation	65
4.2.6	Trainingstechniken und Erweiterungen der Lernregel	69
4.3	Approximation von Matrizen in einem strukturierten Modell	73
4.3.1	Modellstruktur in Matrixform und angepaßte Lernregel	74
4.3.2	Forderungen an die Lernrate und die Trainingsdaten	75
4.4	Schranken für Ausgangswerte und Ableitungen beim MLP	77
4.4.1	Schranken für Ausgangswerte in Teilbereichen des Eingangsraums	77
4.4.2	Abschätzung partieller Ableitungen in Teilbereichen	78
5	Anwendung der neuronalen Verfahren auf Mehrgelenkroboter	80
5.1	Angepaßte neuronale Modellstruktur	80
5.1.1	Auswahl der Modellstruktur	80
5.1.2	Auswahl der Netze	82
5.2	Training des neuronalen Robotermodells	82
5.2.1	Off-line-Lernen der Roboterdynamik	82

5.2.2	Trainingsbewegungen	83
5.3	Schätzung der Modellfehlerschranken	86
5.3.1	Verwendung lokaler Referenzmodelle	86
5.3.2	Überprüfung der partiellen Ableitungen des Modells	86
5.4	Einsatz der neuronalen Netze in der Regelung	87
5.4.1	Nichtlineare Systementkopplung mit neuronalem Modell	87
5.4.2	On-line-Adaptation an Lastschwankungen	88
6	Ergebnisse aus Simulationen und Experimenten	90
6.1	Gütekriterien	90
6.2	Simulationsergebnisse für einen planaren 4-Gelenk-Manipulator	91
6.2.1	Simulation der Dynamik des planaren 4-Gelenk-Manipulators	91
6.2.2	Modellierung	92
6.2.3	Stabilität	97
6.2.4	Regelung	98
6.2.5	Lastadaptation	100
6.3	Experimentelle Ergebnisse für einen Industrieroboter	102
6.3.1	Industrieroboter Manutec r2	102
6.3.2	Bestimmung der Bewegungsdaten	102
6.3.3	Modellierung	103
6.3.4	Schätzung der Modellfehlerschranken	111
6.3.5	Entwurf eines stabilen Reglers	114
6.3.6	Reglerimplementation für den Industrieroboter	115
6.3.7	Regelung	117
7	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	123
7.1	Zusammenfassung der Methodik	123
7.2	Zusammenfassung der Ergebnisse beim Roboter	124
7.3	Relevanz der Ergebnisse	127
A	Anhang	128
A.1	Zusammenhang zwischen normierten und ursprünglichen Faktoren β_i	128
A.2	Technische Daten des 4GM	129
A.3	Geschlossene Dynamikgleichungen des 4GM	129
A.4	Daten für die Profilerzeugung beim Manutec r2	130
A.5	Transputer-Netz	131
	Literaturverzeichnis	132