

Fabian Schnelle

**Modellprädiktive Ansätze zur
Regelung von unteraktuierten
Mehrkörpersystemen**



Modellprädiktive Ansätze zur Regelung von unteraktuierten Mehrkörpersystemen

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und
Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von
Fabian Schnelle
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Robert Seifried

Tag der mündlichen Prüfung: 23. März 2018

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2018

Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische
Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 54/2018

Fabian Schnelle

**Modellprädiktive Ansätze zur Regelung von
unteraktuierten Mehrkörpersystemen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5924-3

ISSN 1861-1651

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische und Numerische Mechanik (ITM) an der Universität Stuttgart.

Als Erstes möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard für die Übernahme des Hauptberichts und die Betreuung während meiner Zeit am Institut danken, während der er mich immer gefordert und mir dabei aber zu den richtigen Zeitpunkten die nötigen Freiheiten gelassen hat. Ich denke gerne an die ersten Gespräche mit ihm während meines Studiums zurück, bei denen ich schnell gemerkt habe, was das ITM für ein besonderes Institut sowohl in fachlicher als auch in menschlicher Hinsicht ist. Ganz besonders habe ich die tolle Institutsatmosphäre schätzen gelernt. Als Leiter des Instituts hat er es geschafft, eine gelungene Balance zwischen produktiver wissenschaftlicher Arbeit und der nötigen Lockerheit zu finden. Für die Möglichkeit in dieser Atmosphäre mitwirken zu dürfen danke ich ihm sehr.

Mein Dank gilt auch Prof. Dr.-Ing. Robert Seifried für die Übernahme und schnelle Erstellung des Mitberichts und ganz besonders für die langjährige wertvolle fachliche Begleitung. Seine Begeisterung für die Regelung von unteraktuierten Mehrkörpersystemen hat mich bereits während meiner Bachelorarbeit erfasst und war ein wichtiger Faktor für meine erfolgreiche Promotion in diesem Gebiet.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei meinen Institutskollegen bedanken, die alle zur tollen Stimmung am Institut beitragen und mit denen ich neben zahlreichen fachlichen Diskussionen auch viel Spaß abseits der Forschung hatte. Ebenfalls danke ich allen meinen Studenten, die ich betreut habe und die wertvolle Beiträge für meine Arbeit geliefert haben.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mich immer mit voller Unterstützung begleitet und mir somit diesen Weg ermöglichen haben. Mein allergrößter Dank gilt meiner wundervollen Frau Fabiana, die mir in all den Jahren mit ihrer Liebe, ihrem Rat und ihrem Humor immer zur Seite stand und die uns vor Kurzem unser größtes Glück, unsere Tochter Katharina, geschenkt hat.

Fabian Schnelle

Stuttgart, März 2018

Inhalt

Kurzfassung	IX
Abstract	XI
1 Einleitung	1
2 Modellierung und Analyse von Mehrkörpersystemen	5
2.1 Grundlagen der Mehrkörperdynamik	5
2.2 Flexible Mehrkörpersysteme	7
2.2.1 Beschreibung eines flexiblen Körpers	8
2.2.2 Modellreduktion	8
2.2.3 Ansatz des mitbewegten Referenzsystems	9
2.2.4 Bewegungsgleichungen	10
2.3 Unteraktuierte Mehrkörpersysteme	11
2.4 Systemdynamische Analyse	12
2.4.1 Jacobi-Linearisierung	13
2.4.2 Zustandsraumdarstellung	13
2.4.3 Ein-/Ausgangsnormform	14
2.4.4 Nulldynamik	16
3 Modellprädiktive Regelungsansätze	19
3.1 Theoretische Grundlagen	20
3.1.1 Grundidee	21
3.1.2 Formulierung des Optimalsteuerungsproblems	22
3.1.3 Stabilität	23
3.2 Lineare MPC-Ansätze	25

3.2.1	Zeitdiskretisierung	28
3.2.2	Überführung in ein linear-quadratisches Optimierungsproblem	28
3.2.3	Totzeitbehaftete Systeme	32
3.2.4	Explizite modellprädiktive Regelung	36
3.2.5	MPC auf Basis der Bewegungsgleichungen	41
3.3	Nichtlineare MPC-Ansätze	46
3.3.1	Inversionsbasierte Vorsteuerung und lineare zeitvariante MPC	47
3.3.2	Feedback-Linearisierung und lineare MPC	51
3.3.3	Gradientenbasierter NMPC-Algorithmus	59
4	Adaptive MPC-Ansätze für unsicherheitsbehaftete MKS	65
4.1	Grundlagen und Überblick	66
4.2	Adaptive MPC über Update des Prädiktionsmodells	67
4.2.1	Adaptive lineare MPC	68
4.2.2	Adaptive nichtlineare MPC bestehend aus Feedback-Linearisierung und adaptiver linearer MPC	69
4.3	MPC mit Störungsprädiktion	72
4.4	Zustands- und Parameterschätzung	74
4.4.1	Joint Unscented Kalman Filter	75
4.4.2	Dual Unscented Kalman Filter	76
4.4.3	Diskussion	77
4.5	Fuzzy-arithmetische Unsicherheitsanalyse der adaptiven Regler	79
4.5.1	Grundlagen der Fuzzy-Arithmetik	80
4.5.2	Nachweis der Funktionsweise und Robustheit	82
4.5.3	Sensitivitätsanalyse mittels Einflussmaßen	84
5	Simulative und experimentelle Anwendungsbeispiele	87
5.1	Rotatorischer Kran	88
5.1.1	Mechanisches Modell und verwendete Regler	89
5.1.2	Simulative Untersuchungen	92
5.2	Serielle Manipulatoren	95

5.2.1	Gelenkelastizitäten	95
5.2.2	Passives Gelenk	100
5.2.3	Elastische Arme	105
5.3	EXPO-Pendel	109
5.3.1	Mechanisches Modell und Regelkreisstruktur	110
5.3.2	Simulative und experimentelle Untersuchungen	112
5.4	Schunk-Roboter	117
5.4.1	Mechanisches Modell und verwendete Regler	117
5.4.2	Simulative und experimentelle Untersuchungen	120
6	Zusammenfassung	125
	Literatur	129