

MODELLIERUNG UND MODELLBASIERTE REGELUNG VON KONTINUUM-MANIPULATOREN

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

vorgelegt von

Valentin Falkenhahn

geboren in Heidelberg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alin Albu-Schäffer
Tag der mündlichen Prüfung: 13. April 2017

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2017

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 32

Valentin Falkenhahn

Modellierung und modellbasierte Regelung von
Kontinuum-Manipulatoren

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Informationen 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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5321-0

ISSN 1863-9046

DOI 10.2370/9783844053210

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96-0 • Telefax: 02407 / 95 96-9

Internet: www.shaker.de • Email: info@shaker.de

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart und als Doktorand in der Abteilung Research Mechatronic Systems der Festo AG & Co. KG in Esslingen.

Ich möchte meinen Dank insbesondere an den Institutsdirektor des ISYS, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, für die wissenschaftliche Betreuung, Unterstützung und Förderung sowie das entgegengebrachte Vertrauen und die weitreichenden Freiheiten während meiner Anstellung am Institut richten. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alin Albu-Schäffer, Leiter des Lehrstuhls für sensorbasierte Robotersysteme und intelligente Assistenzsysteme der Technischen Universität München und Direktor des Instituts für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts. Für die umfangreiche Betreuung und Unterstützung bei Festo bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Rüdiger Neumann und Dr.-Ing. Alexander Hildebrandt, sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Post, Leiter des Bereichs Corporate Research, für die Ermöglichung dieser erfolgreichen Kooperation.

Die Arbeit am ISYS und bei Festo hat mir viel Freude bereitet und die viereinhalb Jahre deutlich kürzer erscheinen lassen. Für die freundschaftliche und entspannte Arbeitsatmosphäre an beiden Arbeitsplätzen mit sowohl fachlichen als auch nicht-fachlichen Diskussionen bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen. Diese wissenschaftliche Arbeit wäre nicht ohne die Denkanstöße, Hilfestellungen und kritischen Fragen von Simon Alt, Kai-Uwe Amann, Dr.-Ing. Frank Bender, Martin Bochterle, Dr.-Ing. Matthias Doll, Gabriel Dämmer, Michael Heidingsfeld, Alexander Keck, Annika Mayer, Patrick Olivan, David Rager, Florentin Rauscher, Dr.-Ing. Silvia Rummel, Dr.-Ing. Jürgen Ruoff, Dr.-Ing. Ulf Schaper und den Studierenden, die mich über die Jahre begleitet haben, entstanden. Ein besonderes Dankeschön geht an Dr.-Ing. Tobias Mahl für die intensive Einarbeitung in das Gebiet der Kontinuum-Manipulatoren, sowie an Dr.-Ing. Benjamin Henke für die langjährige Diskussionspartnerschaft am ISYS, bei Festo und auf Dienstreisen. Außerdem bedanke ich mich bei Gerlind Preisenhammer, Corina Hommel, Dr.-Ing. Eckart Arnold, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zeitz, Joachim Endler und Peter Bachhuber, die mich in vielfältiger Weise unterstützt haben.

Nicht zuletzt gilt mein ausdrücklicher Dank meiner Familie und meinen Freunden für die nicht selbstverständliche Unterstützung und den großen Rückhalt. Ohne sie wäre ich nicht so weit gekommen. Der größte Dank gebührt meiner Frau Johanna, die mich mit ihrer unendlichen Geduld von Anfang bis Ende begleitet hat und dabei selbst oft zurückstecken musste. Vielen Dank für deine immerwährende Unterstützung.

Stuttgart, im April 2017

Valentin Falkenhahn

KURZZUSAMMENFASSUNG

Kontinuum-Manipulatoren gehören zu einer neuartigen Roboterklasse und erschließen durch ihre gelenkfreien, kontinuierlichen Verformungen neue Anwendungsfelder – insbesondere deren pneumatisch aktuierte Unterklasse, die aufgrund ihrer inhärenten Nachgiebigkeit besonders für die Mensch-Maschine-Interaktion geeignet ist.

Für die praktische Anwendbarkeit von Kontinuum-Manipulatoren sind schnellere und präzisere Bewegungen erforderlich. Daher wird eine modellbasierte Folgeregelung der Aktorkoordinaten für Kontinuum-Manipulatoren entwickelt, die ein gutes Führungs- und verbessertes Störverhalten bei dynamischer Anregung ermöglicht. Die Vorgabe der Führungsgrößen erfordert Methoden der Trajektoriengenerierung.

Die Entwicklung dieser Methoden und deren experimentelle Umsetzung erfolgt anhand eines Beispielmanipulators, des Bionischen Handling-Assistenten (BHA). Im Rahmen der dynamischen Modellierung wird die verteilte Manipulormasse über konzentrierte Sektionsmassen approximiert. Der Manipulator wird stets im kontaktfreien Raum bewegt.

Die kinematische Beschreibung des Manipulators erfolgt über den Ansatz konstanter Sektionskrümmungen. Darauf aufbauend wird das dynamische Modell über ein Ersatzmodell mit konzentrierten Massen hergeleitet, indem die Lagrangeschen Gleichungen 2. Art analytisch bestimmt werden, sodass die Bewegungsgleichungen der Aktoren zuletzt in klassischer Form vorliegen. Das Reglerkonzept besteht aus einem Kaskadenregler mit überlagertem Balglängen- und unterlagertem Balgdruckregler. Für die Entwicklung des entkoppelnden Balglängenreglers wird eine modellbasierte Zustandslinearisierung mit einem linearen PID-Regler und einer Vorsteuerung kombiniert. Da die Aktoren des Manipulators nur mechanisch verkoppelt sind, können die unterlagerten Druckregler stets dezentral entworfen werden. Für die Trajektoriengenerierung ist zur Berücksichtigung von Beschränkungen v. a. die redundante Rückwärtskinematik und bei zeitoptimalen Bewegungen außerdem die Aktordynamik hinzuzuziehen. Beispielhaft werden daher zeitoptimale Punkt-zu-Punkt-Trajektorien über einen Optimalsteuerungsansatz und onlinefähige Trajektorienvorgaben über eine quadratische Optimierung vorgestellt.

Der entwickelte modellbasierte Regler mit einem signifikant verbesserten Führungs- und Störverhalten erlaubt schnelle und präzise Bewegungen generierter Aktortrajektorien aus Vorgaben von Aufgabenkoordinaten. Über die vorgestellten Methoden zur Trajektoriengenerierung können zeitoptimale Punkt-zu-Punkt Trajektorien offline berechnet werden. Außerdem können Aufgabentrajektorien onlinefähig in Aktorgeschwindigkeiten transformiert werden, sodass z. B. eine intuitive Geschwindigkeitsvorgabe des Tool Center Points (TCP) möglich ist. Darüber hinaus kann das entwickelte dynamische Modell für erweiterte Reglerkonzepte hinsichtlich TCP-Regelungen oder Kraft- bzw. Impedanzregelungen verwendet werden.

ABSTRACT

Continuum manipulators represent a new class of robots, enabling new fields of applications with a continuous deformation of their structure instead of discrete joints as in the case of rigid-link robots. Especially pneumatically actuated continuum manipulators are inherently compliant and, hence, well suited for human machine interaction.

Fast and precise motions are necessary for industrial applications of continuum manipulators. Therefore, a model-based tracking controller in actuator coordinates for continuum manipulators is developed in order to improve the tracking behavior and the disturbance rejection behavior for dynamic excitations. Furthermore, corresponding algorithms for trajectory generation are needed.

For the dynamic modeling, the development of the new methods and their experimental implementation is developed on an example manipulator, the Bionic Handling Assistant (BHA). For the dynamic modelling the distributed mass of the manipulator is approximated with concentrated section masses. Moreover, the manipulator is moved in contact free space.

The development of the dynamic model is based on constant curvature kinematics. Using concentrated masses and the Euler–Lagrange formalism, the equations of motion for the actuators can be obtained analytically in classical form. The cascaded control concept uses an outer actuator length controller and an inner pressure controller. The centralized actuator length controller combines a model-based feedback linearization with PID and linear feedforward controllers. As the couplings of the manipulator are only of mechanical nature, the underlying pressure controllers can be decoupled. For the trajectory generation, the redundant inverse kinematics are considered while time-optimal motions also depend on the dynamic behavior of actors. Exemplary, time optimal point-to-point trajectories are solved offline using optimal control techniques and trajectories are generated online using quadratic programming.

The presented model-based controller significantly improves the tracking and disturbance rejection behavior and, hence, enables fast and precise motions of generated actuator trajectories generated from given task coordinates. Trajectories for time-optimal point-to-point motions are generated offline while actuator velocities can be computed online from desired tool center point (TCP) velocities in order to provide an intuitive joystick input. Furthermore, the newly developed dynamical model can be used for enhanced control concepts like TCP-control or impedance control during contacts with the environment.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	vii
Kurzzusammenfassung & Abstract	viii
1 Einführung	1
1.1 Stand der Technik	2
1.1.1 Kontinuum-Manipulatoren	2
1.1.2 Dynamische Modellierung von Kontinuum-Manipulatoren	5
1.1.3 Regelung von Kontinuum-Manipulatoren	7
1.1.4 Trajektoriengenerierung für Kontinuum-Manipulatoren	11
1.2 Ziele der Dissertation & Gliederung der Arbeit	12
2 Modellbildung	15
2.1 Der Bionische Handling-Assistent	15
2.2 Modellierung der Komponenten	19
2.2.1 Einzelbalg	19
2.2.2 Proportionalventil	20
2.2.3 Pneumatischer Schlauch	22
2.3 Modellierung des Manipulators	25
2.3.1 Kinematische Modellierung	25
2.3.2 Bestimmung der differentiellen Kinematik	32
2.3.3 Dynamische Modellierung	35
2.4 Identifikation und Validierung	49
2.4.1 Einzelbalg	49
2.4.2 Proportionalventile	50
2.4.3 Pneumatische Schläuche	54
2.4.4 Manipulatormodell	55
2.5 Zusammenfassung	64
3 Regelung in Aktorkoordinaten	65
3.1 Struktur der Regelung	65
3.2 Unterlagerte Druckregelung	66
3.2.1 Klassische Druckregelkonzepte	67
3.2.2 Balgdruckbeobachter	70
3.2.3 Erweiterte Druckreglerkonzepte	76
3.2.4 Vergleich und Bewertung der Druckregler	82
3.3 Dezentraler Balglängenregler	85
3.3.1 Reglerentwurf	85
3.3.2 Funktionsnachweis am Einzelbalg	86
3.4 Zentraler Balglängen-Entkopplungsregler	89
3.4.1 Reglerentwurf	89
3.4.2 Funktionsnachweis am Manipulator und Performancevergleich	93

3.5	Zusammenfassung	98
4	Trajektorien-generierung	101
4.1	Zeitoptimale Punkt-zu-Punkt-Planung	102
4.1.1	Optimalsteuerungsansatz	103
4.1.2	Formulierung der Randbedingungen	104
4.1.3	Lösungsverfahren für das Optimalsteuerungsproblem	107
4.1.4	Optimierte Trajektorien	108
4.2	Geschwindigkeitsbasierte Aufgabenplanung	112
4.2.1	Optimierungsansatz	114
4.2.2	Lösungsverfahren für den Online-Einsatz	116
4.2.3	Experimentelle Validierung	118
4.3	Zusammenfassung	121
5	Zusammenfassung	123
Anhang		
A	Ergänzungen zur Modellierung	127
B	Ausgewählte Parameterwerte	133
Abkürzungsverzeichnis & Glossar		135
Symbol- und Operatorenverzeichnis		136
Abbildungsverzeichnis		139
Tabellenverzeichnis		141
Literaturverzeichnis		143