

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 36

Stefan Flixeder

**Force-Based Cooperative Manipulation
of Highly Deformable Materials**

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Wien, TU, Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5401-9

ISSN 1866-2242

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) an der Technischen Universität Wien. Das Projekt ist Teil des Festo-Systemlabors, einer Forschungsk Kooperation zwischen dem ACIN und der FESTO AG & CO. KG. In diesem Zusammenhang gilt mein besonderer Dank der Gesellschafterfamilie Stoll für die Initiierung und Finanzierung dieser Kooperation.

Ebenfalls recht herzlich danken möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Andreas Kugi. Danke Andreas für deinen fachlichen Rat, deine Begeisterungsfähigkeit sowie dein Vertrauen und unermüdliches Engagement gegenüber deinen Mitarbeitern. Mein weiterer Dank gilt Prof. Dr. Tsu-Chin Tsao und Ao.Prof. Dr. Markus Vincze für die Erstellung der Gutachten und Prof. Dr. Wolfgang Gawlik für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Bedanken möchte ich mich auch recht herzlich bei Dr. Tobias Glück. Vielen Dank Tobias für eine stets offene Tür, unzählige anregende Diskussion und deinen unaufhörlichen Enthusiasmus.

Allen Kolleginnen und Kollegen am ACIN möchte ich für den fachlichen Austausch und die produktive Arbeitsatmosphäre danken. Viele humorvolle Momente innerhalb und außerhalb der Arbeitszeit machten die Zeit am Institut kurzweilig und unvergesslich.

Schließlich gilt mein Dank meiner Familie, allen voran meinen Eltern für den Rückhalt und die jahrelange Unterstützung. Mein abschließender Dank gilt meiner Frau Evelyn. Danke für dein Verständnis, deine liebevolle Unterstützung und deine unerschöpfliche Lebensfreude.

Wien, im Mai 2017

Stefan Flixeder

Abstract

This work is concerned with the automated manipulation of highly deformable materials, e.g., fabrics, textiles, leather, and adhesive foils. Although these materials are used in many industries, its handling is still mostly done manually. This is mainly due to the materials' complex geometric properties, i.e., the large scale and high parts variance in combination. To tackle the main challenges while providing maximum flexibility, this work proposes a force-based manipulation approach, where several manipulators cooperatively handle the material. For this purpose, suitable model-based control concepts are developed and investigated on a lab-scale demonstrator.

The proposed demonstrator provides the basic functionality for a so-called preforming task, i.e., a scenario encountered during the manufacturing of fiber reinforced plastics where the deformable material is draped over a complex mold. To systematically incorporate the material properties into the demonstrator and the controller design, a tailored material model is developed for the considered materials. By combining the material model and a detailed mathematical model of the demonstrator, a simulation model of the overall preforming process is derived. The proposed process model serves as a basis for the design of various control and signal processing approaches.

For the implementation of the force-based handling approach, this work investigates different signal processing strategies for a force sensor mounted on the manipulators' end-effector. The proposed strategies are evaluated in terms of performance and implementation costs. Moreover, the merits and limitations regarding force-control stability are discussed in detail. By considering the dynamics of the signal processing and the properties of the deformable material in the force-controlled closed-loop system, practical conditions to preserve coupled system stability of the interacting manipulators are derived. These conditions are utilized for the selection of the target dynamics in order to experimentally evaluate and compare different force-control implementations in view of the cooperative

handling approach.

To avoid bridging and curl ups during the lay-up of the deformable materials on a complex mold, an additional consolidation tool is utilized. The control task is to apply a constant consolidation force while the tool moves along the mold. For this purpose, this work proposes an approach to simultaneously but independently control the orthogonal and tangential force/compliance with respect to a given path. A path-following control concept known as transverse feedback linearization is combined with force control. The subordinate path following controller transforms the nonlinear dynamics into a linear system with decoupled transversal and tangential dynamics via a coordinate and feedback transformation. The outer control loop utilizes force control to obtain the desired target impedance in the respective transformed coordinates.

At last, the developed methods and control concepts are combined in a force-based motion planning framework to solve the preforming task including the pick-up, the transportation, and the lay-up of a strip-like material on a complex mold. The proposed framework does not rely on preplanned position trajectories but calculates the movements of all manipulators on-line and can promptly react to external disturbances. Experimental results on the demonstrator underline the feasibility and performance of the presented approach for the lay-up of different highly deformable materials on a double-curvature mold.

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der automatisierten Handhabung von formlabilen Materialien, wie z.B. Halbzeugen, Textilien, Leder und Folien. Trotz der vielseitigen Verwendung dieser Materialien in der industriellen Fertigung basiert deren Handhabung weitgehend auf manuellen bzw. teil-automatisierten Prozessen. Schwierigkeiten bei der Automatisierung stellen vor allem die geometrische Ausdehnung, die große Variantenvielfalt und die Formlabilität dar. Bekannte Automatisierungslösungen sind äußerst applikationsspezifisch. Im Unterschied dazu verfolgt diese Arbeit einen modularen Ansatz auf Basis konventionell erhältlicher Aktoren und Sensoren. Durch das gezielte Ausnutzen von Modellwissen und der Rückführung von Kraft- und Positionsinformation werden mehrere einfache Manipulatoren zum Lösen einer komplexen Handhabungsaufgabe miteinander koordiniert. Das Potential dieses flexiblen Ansatzes für die Handhabung formlabiler Materialien wird anhand eines prototypischen Handhabungssystems zur Ablage von z.B. Kohlefaser-Halbzeugen auf einem Formwerkzeug validiert.

Zu Beginn dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell zur Beschreibung der makroskopischen Eigenschaften der betrachteten formlabilen Materialien bei der Handhabung erstellt. Diese Eigenschaften werden im Sinne eines mechatronischen Systementwurfs bei der Konstruktion eines prototypischen Handhabungssystems berücksichtigt. Ein mathematisches Modell des Handhabungssystems in Kombination mit dem Materialmodell dient als Simulationsmodell für den Ablageprozess und bildet die Grundlage für den Entwurf diverser Regelungs- und Beobachterkonzepte.

Für die messtechnische Erfassung der Materialbelastungen während der Handhabung werden die Manipulatoren mit Mehrachs-Kraftsensoren am Endeffektor ausgestattet. Für die Aufbereitung der Messsignale werden verschiedene Filter und modellbasierte Beobachterkonzepte untersucht. Der Einfluss der Signalaufbereitung sowie der spezifischen Charakteristika der formlabilen Materialien auf die Stabilität der kraftgeregelten Manipulatoren wird ausführlich diskutiert. Für

die systematische Wahl der Zielparameter der Kraftregelung werden notwendige Bedingungen zur Erhaltung der Kontaktstabilität ermittelt. Auf Basis dieser Kriterien werden verschiedene Kraftregelungsstrategien anhand diverser Szenarien experimentell untersucht und validiert.

Um ein faltenfreies Ablegen der formlabilen Materialien in bzw. auf komplexen Formen zu gewährleisten, wird ein Manipulator mit einem Drapierwerkzeug ausgestattet. Für die Aufbringung einer konstanten orthogonalen Kraft auf das Formwerkzeug wird ein Konzept zur gleichzeitigen und unabhängigen Regelung der tangentialen bzw. orthogonalen Nachgiebigkeit auf einem vorgegebenen Pfad vorgestellt. Mittels einer geeigneten Koordinatentransformation und einer exakten Eingangs-Ausgangslinearisierung wird das Originalsystem in zwei lineare, entkoppelte Teilsysteme tangential bzw. orthogonal aufgespalten. Die überlagerte Nachgiebigkeitsregelung ermöglicht die unabhängige Zielimpedanzvorgabe in den entsprechenden Teilsystemen.

Sämtliche entwickelten Regelungskonzepte werden schließlich auf dem prototypischen Handhabungssystem kombiniert. Die Bewegung der einzelnen Manipulatoren wird auf Basis von Kraft- und Positionsinformation zur Laufzeit koordiniert und bei Störungen entsprechend adaptiert. Die kontrollierte Vorgabe der Materialzugspannung während der Handhabung ermöglicht eine sichere Aufnahme, die Beibehaltung der geometrischen Bestimmtheit während der Handhabung und ein faltenfreies Ablegen auf komplexen Formwerkzeugen.

Die Anwendbarkeit des Konzepts wird experimentell durch Versuche am Prototypen validiert. Die erarbeiteten Konzepte sind übertragbar auf zahlreiche andere Fragestellungen, wie zum Beispiel dem automatisierten Aufkleben von Folien und der Handhabung von Textilien.

Contents

Nomenclature	11
1 Introduction	1
1.1 Scenario	1
1.2 Challenges and state-of-the-art solutions	2
1.3 Cooperative multi-arm manipulation	4
1.4 Modeling of highly deformable materials	4
1.5 Objectives and contributions	5
1.6 Outline of the thesis	6
2 Design of a Demonstrator	9
2.1 Handling system	9
2.2 End-effector	10
2.2.1 Grasping	12
2.2.2 Consolidation	12
2.3 Summary	13
3 Mathematical Modeling	15
3.1 Highly deformable material	15
3.1.1 Catenary	16
3.1.2 Catenary in contact with a consolidation arm	19
3.2 Handling arms	23
3.2.1 Analysis	24
3.2.2 Biaxial gantry	27
3.2.3 End-effector	29
3.2.4 Equations of motion	31
3.2.5 Parameter identification and model validation	32

3.3	Process model	39
3.4	Summary	41
4	Controller Design	43
4.1	Controller design model	43
4.1.1	Handling arms	44
4.1.2	Interaction model	44
4.1.3	Summary	47
4.2	Position control	48
4.3	Force control	49
4.3.1	Force signal processing	51
4.3.1.1	Linear filters	51
4.3.1.2	Observer design	52
4.3.1.3	Experimental results	54
4.3.2	Coupled system stability	58
4.3.3	Experimental results	65
4.4	Path-following control	71
4.4.1	Controller design model	73
4.4.2	Path parametrization and assumptions	73
4.4.3	Control objectives	74
4.4.4	Coordinate transformation	75
4.4.5	Feedback linearization	78
4.4.6	Control of the tangential and orthogonal subsystem	79
4.4.6.1	Position control	79
4.4.6.2	Force control	80
4.4.7	Experimental results	83
4.4.7.1	Elliptic path	84
4.4.7.2	Mold shape approximated by cubic splines	89
4.5	Summary	93
5	Force-Based Cooperative Manipulation	95
5.1	On-line motion planning	96
5.1.1	Coordinated transportation	96
5.1.2	Avoidance of premature contact	99
5.1.3	Alignment	100
5.1.4	Contact establishment	101
5.1.5	Coordinated lay-up	101
5.2	Experimental results	103
5.2.1	Measurements in the Cartesian plane	104
5.2.2	Transportation and alignment	105
5.2.3	Consolidation and coordinated lay-up	105
5.2.4	Collaboration with a human operator	108
5.3	Discussion	108

<i>Contents</i>	9
6 Conclusions and Outlook	109
A Videos	113
B Parameter	115
References	119