

# **Einhändige kraftbasierte Handhabung deformierbarer linearer Objekte**

Von der Universität Bayreuth  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat)  
genehmigte Abhandlung

von  
Antoine Schlechter  
aus Luxemburg

1. Gutachter: Prof. Dr. Dominik Henrich
2. Gutachter: Prof. Dr. Hans-Josef Pesch

Tag der Einreichung: 15. 2. 2007

Tag des Kolloquiums: 19. 7. 2007



Berichte aus der Robotik

**Antoine Schlechter**

**Einhändige kraftbasierte Handhabung  
deformierbarer linearer Objekte**

Shaker Verlag  
Aachen 2007

**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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6692-9

ISSN 1434-8098

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von Juni 2001 bis Juli 2003 in der Arbeitsgruppe „Eingebettete Systeme und Robotik“ des Fachbereichs Informatik an der Technischen Universität Kaiserslautern und von August 2003 bis Januar 2007 am Lehrstuhl „Angewandte Informatik III – Robotik und Eingebettete Systeme“ an der Universität Bayreuth.

Während den Forschungsarbeiten, die zu dieser Dissertation geführt haben, wurde intensiv das Computeralgebra-System Maple der Firma Maplesoft in der Version 9.5 verwendet. Einige der Rechnungen sind ohne die Verwendung eines solchen Hilfsmittels kaum zu bewerkstelligen.

Ich möchte mich bei allen bedanken, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben, ganz besonders natürlich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Dominik Henrich, für die gute, ständig begleitende und immer wieder anregende Betreuung meiner Arbeit und bei den Kollegen im Lehrstuhl für ihre Hilfe bei Fragestellungen aus ihren besonderen Kompetenzbereichen. Insbesondere die Metadiskussionen über wissenschaftliches Arbeiten und wissenschaftliche Publikationen mit allen Mitgliedern des Lehrstuhls haben wesentlich zur Abrundung dieser Arbeit beigetragen. Aber auch meinen Eltern, verschiedenen Lehrern, Tutoren und Hiwis gilt mein besonderer Dank dafür, dass sie unabhängiges Denken gefördert und mir gleichzeitig die Wichtigkeit von „Regeln“, Ordnung und Exaktheit vermittelt haben. Großen Dank auch an meine Freundin und nunmehr Ehefrau Annemie Rippinger, die so geduldig auf die Fertigstellung dieser Arbeit und meine Rückkehr nach Luxemburg gewartet hat.

Pontpierre, im Oktober 2007

Antoine Schlechter



# Zusammenfassung

Im alltäglichen Leben begegnet man einer Vielzahl von deformierbaren linearen Objekten wie zum Beispiel Kabeln, Schläuchen, Federn, Drähten, Schnüren, Seilen, usw. Die Form solcher Objekte kann meist leicht und in deutlichem Ausmaß verändert werden. Deshalb sehen zwei im Prinzip gleiche deformierbare Objekte, selbst bei nur leicht unterschiedlicher Historie, nur in den seltensten Fällen auch tatsächlich gleich aus. Zusätzlich führen Schwer-, Trägheits- und Kontaktkräfte zu weiteren Verformungen.

Die sogenannte inverse Simulation, in einer gegebenen Umwelt für eine gewünschte Veränderung der Position und Form eines Objektes eine dorthin führende Bewegung des Robotergreifers zu finden, ist für deformierbare lineare Objekte im Gegensatz zu starren Körpern also nicht trivial lösbar. Bei der Handhabung deformierbarer Objekte mit einem Roboter muss immer eine mehr oder weniger komplexe inverse Simulation gelöst werden und jede Lösung muss immer mindestens im Rahmen der unsicheren Ausgangsformen des Werkstücks fehlertolerant sein.

Die Form eines Werkstücks kann zu jedem Zeitpunkt unmittelbar von der aktuellen Position des Roboters bestimmt sein, oder sie kann sich unabhängig von der Bewegung des Roboters, also auch bei Stillstand des Roboters, kontinuierlich verändern. Im ersten Fall spricht man von statischen, im zweiten Fall von dynamischen Deformationen.

Bei den dynamischen Deformationen handelt es sich meist um Schwingungen des Werkstücks. Die dynamische inverse Simulation besteht im Allgemeinen also darin, Roboterbewegungen zu finden, die zu einer gewünschten Objektschwingung führen beziehungsweise eine vorhandene Objektschwingung eliminieren. In dieser Arbeit werden Bewegungsmuster für einen einzelnen Robotergreifer vorgestellt, die in der Lage sind, vorhandene Schwingungen eines elastisch deformierbaren linearen Werkstücks zu dämpfen beziehungsweise ein solches Werkstück möglichst schwingungsfrei zu transportieren. Die Parameter dieser Bewegungsmuster können alle aus den Messdaten eines zwischen Roboterhand und Greifer montierten Kraft/Moment-Sensors für das tatsächlich gegriffene Objekt berechnet werden.

Bei den statischen Deformationen handelt es sich meist um Deformationen durch Kontaktkräfte. Die statische inverse Simulation besteht also darin, Roboterbewegungen zu finden, die zu einer gewünschten Objektdeformation in einem Kontaktpunkt, zu einer gewünschten Kontakterstellung, zu einer gewünschten Kontaktauflösung oder zu keiner Veränderung der aktuellen Kontakte zwischen Werkstück und Umwelt führen. Wegen der unsicheren Ausgangsformen des Werkstücks müssen insbesondere die Kontaktmodifikationen während der berechneten Roboterbewegungen mit Hilfe von Sensoren bestätigt werden. In dieser Arbeit wird ein mathematisch geschlossener Zusammenhang zwischen der Position und Orientierung eines einzelnen Robotergreifers, den Positionen der Kontakte zwischen Werkstück und Umwelt entlang des deformierbaren linearen Werkstücks und den Richtungen der Werkstücktangentialen in den Kontaktpunkten hergeleitet. Dieser ermöglicht die Lösung der statischen inversen Simulation mit zusätzlichen Angaben über deren Lösbarkeit. Es wird festgestellt, dass der Einflussbereich des Greifers etwa bis zum dritten Kontakt ab dem Greifer reicht, und dass der Erfassungsbereich eines zwischen Roboterhand und Greifer angebrachten Kraft/Moment-Sensors nur bis zum zweiten Kontaktpunkt reicht. Dabei erfolgt die Überwachung von Kontaktmodifikationen auf Basis von Knicken und Sprüngen im Verlauf des im Greifer gemessenen Moments. Ein Verfahren zum Erkennen von Knicken und Sprüngen in eindimensionalen, möglicherweise veräuschten Signalen wird vorgestellt und analysiert.

Aus den detaillierten Betrachtungen werden optimale Strategien für die einhändige kraftbasierte Handhabung und Montage elastisch deformierbarer linearer Werkstücke mit mehreren Kontakten zur Umwelt hergeleitet. Diese werden erfolgreich auf einige Beispiele angewandt.



# Single-handed Force-based Manipulation of Deformable Linear Objects

## *Abstract*

In everyday life there are many different deformable linear objects, such as cables, hoses, leaf springs, wires, ropes, etc. The shape of such objects can be changed easily and significantly. Thus, even two basically identical deformable objects with closely the same history rarely look the same. Furthermore, gravitational, inertial, and contact forces may produce additional deformation.

In manipulation, the so-called inverse simulation problem consists in finding a robot motion that leads to a given shape and position of an object. This problem cannot easily be solved for deformable objects as opposed to rigid objects. In the manipulation of deformable linear objects, there is always a more or less complex inverse simulation problem to be solved and every solution has to be fault-tolerant at least within the range of uncertainties about the original shape of the manipulated object.

The deformation of a workpiece may directly be dependent on the current position of the robot. Such deformations are called static. On the other hand, the shape may change continuously and independently of the robot motion, even when the robot is at rest, such deformations being called dynamic.

Dynamic deformations are mostly oscillations of the workpiece. Thus, the dynamic inverse simulation problem consists in finding robot motions to produce a desired oscillation or to eliminate an existing oscillation. This thesis describes motion patterns for the damping of existing oscillations of an elastically deformable linear object and for the oscillation-free transport of such objects with a single robot gripper. All parameters of these motion patterns can be calculated for the currently gripped object based on the measurements from a wrist-mounted force/torque-sensor.

Static deformations are mostly caused by contact forces. Thus, the static inverse simulation problem consists in finding robot motions to produce a given object deformation in a given contact point, to establish or remove a given contact, or to leave all current contacts between the workpiece and the environment unchanged. Because of the uncertain original shape of the workpiece, modifications to the set of contacts between the workpiece and the environment should always be confirmed based on sensor data. This thesis introduces a closed formula that relates the position and orientation of the robot gripper, the positions along the deformable linear object of the contacts between the object and the environment, and the tangents to the object in these contact points. With this formula, the static inverse simulation problem can be solved and its resolvability can be analyzed. It is found that the effective influence of the robot gripper only ranges up to the third contact from the gripper, and that the coverage of a wrist-mounted force/torque-sensor only ranges up to the second contact. The monitoring of contact modification is based on corners and jumps in the measured torque signal. A method to detect corners and jumps in one-dimensional, possibly noisy signals, is introduced and analyzed.

Finally, optimal strategies for the single-handed force-based manipulation of deformable linear objects are derived. These are applied successfully to sample manipulation tasks.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1..
1.2 Ziele.....	1
1.3 Stand der Forschung.....	4
1.3.1 Versteifung.....	4
1.3.2 Dynamische inverse Simulation.....	5
1.3.3 Statische inverse Simulation.....	7
1.4 Aufgabenstellung.....	10
1.5 Abgrenzung .....	11
1.6 Gliederung.....	12
<b>Kapitel 2 Manipulation mit dynamischen Deformationen .....</b>	<b>13</b>
2.1 Modellierung der DLO-Schwingung.....	13
2.2 Aktive Dämpfungsbewegung.....	15
2.3 Parameterbestimmung aus Sensordaten.....	19
2.4 Erweiterte Parameterbestimmung.....	23
2.5 Schwingungsvermeidung.....	25
2.6 Experimentelle Ergebnisse.....	29
2.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	36
<b>Kapitel 3 Manipulation mit statischen Deformationen.....</b>	<b>39</b>
3.1 DLO-Modell.....	40
3.2 Aufgreifen und Ablegen.....	43
3.3 DLO-Simulation.....	44
3.4 Inverse DLO-Simulation.....	49
3.4.1 Theorie der inversen Simulation.....	49
3.4.2 Praktische Grenzen der inversen Simulation.....	51
3.5 Kräfte und Momente bei Bewegungen in Mehrfachkontakten.....	53
3.5.1 Theoretische Kräfte und Momente.....	53
3.5.2 Experimente.....	57
3.6 Kontaktstabilität.....	68
3.7 Modellanpassung an einer Stabilitätsgrenze.....	74
3.8 Momente an den Übergängen zwischen Mehrfachkontakten.....	81
3.8.1 Knicke im Momentverlauf.....	82
3.8.2 Knickgrößenabschätzung.....	84
3.8.3 Praktische Grenzen der Kontakterkennung durch Knicke.....	86

3.9 Verallgemeinerung.....	88
3.9.1 Kontakte mit dem Endpunkt des DLOs.....	89
3.9.2 Flächenkontakte.....	91
3.9.3 Spontaner Kontaktverlust.....	91
3.9.4 Beidseitige DLO-Montage.....	94
3.9.5 Vorgekrümmte DLOs.....	94
3.9.6 Modellierung in drei Dimensionen.....	96
3.10 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	98
<b>Kapitel 4 Sprung- und Knickerkennung.....</b>	<b>101</b>
4.1 Einleitung.....	101
4.1.1 Stand der Forschung.....	102
4.1.2 Gliederung.....	103
4.2 Erkennen von Sprüngen und Knicken.....	104
4.2.1 Sprungerkennung.....	104
4.2.2 Knickerkennung.....	109
4.3 Unterscheidung zwischen Sprüngen und Knicken.....	112
4.4 Signale mit äquidistanten Messwerten.....	115
4.5 Wahl der Fensterlängen N und M.....	116
4.6 Erkennbarkeit von Sprüngen und Knicken.....	116
4.7 Lernen von Schwellwerten .....	119
4.8 Schlussfolgerung und Zusammenfassung.....	124
<b>Kapitel 5 Anwendung.....</b>	<b>127</b>
5.1 Planung von Montageaufgaben.....	127
5.2 Kraftbasierte Ausführung von Montageaufgaben.....	137
5.2.1 Beidseitige Montage und Einspannen einer Blattfeder.....	137
5.2.2 Fädeln einer Blattfeder durch zwei versetzte Schlitzze.....	140
<b>Kapitel 6 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>143</b>
6.1 Zusammenfassung.....	143
6.2 Ausblick.....	144
<b>Anhang A: Literaturverzeichnis.....</b>	<b>147</b>