

# **Handhabung deformierbarer linearer Objekte basierend auf Kontaktzuständen und optischer Sensorik**

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

von  
**Jürgen Acker**  
aus Edenkoben

1. Gutachter: Prof. Dr. Dominik Henrich
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl

Tag der Einreichung: 18.04.2007

Tag des Kolloquiums: 11.01.2008



Berichte aus der Robotik

**Jürgen Acker**

**Handhabung deformierbarer  
linearer Objekte basierend auf Kontaktzuständen  
und optischer Sensorik**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**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., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7566-2

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**

Entstanden ist die vorliegende Arbeit von September 2001 bis Juli 2003 an der Arbeitsgruppe „Eingebettete Systeme und Robotik“ an der Technischen Universität Kaiserslautern und von August 2003 bis Februar 2007 am Lehrstuhl „Angewandte Informatik III – Robotik und Eingebettete Systeme“ an der Universität Bayreuth, wo ich jeweils als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig gewesen bin.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Dominik Henrich und allen anderen, die mir diese Arbeit ermöglicht sowie zu ihrem Gelingen durch Anregungen, wissenschaftliche Diskussionen, Kritik oder Korrekturlesen beigetragen haben.

Fürth, im April 2008

Jürgen Acker



## Zusammenfassung

Neben formfesten Werkstücken gibt es in der industriellen Montage auch deformierbare Objekte. Hier spielen vor allem Kabel, Schläuche, Federn oder Drähte eine Rolle. Die Handhabung solcher deformierbaren, linearen Objekte ist bis jetzt noch wenig automatisiert, weshalb als Ziel ein systematischer Ansatz zu deren Handhabung angestrebt wird. Die Form solcher Werkstücke verändert sich während der Montage meist deutlich, wobei die endgültige Form nicht nur von Kontaktkräften sondern auch von der Historie abhängt. Daher ist der Einsatz von Sensoren zur Ausführung von Montagen mit deformierbaren Werkstücken sinnvoll.

Der Ausgangspunkt für diese Arbeit ist das Ziel eines systematischen Ansatzes zur Handhabung von deformierbaren, linearen Objekten. Im Vordergrund stehen dabei Montageaufgaben für schwach elastisch deformierbare, lineare Objekte in einer Umgebung aus starren Objekten, deren Oberflächen nicht gekrümmt sind. Um zum Erreichen dieses Ziels beizutragen, wird die Beschreibung von Montageaufgaben und die Ausführung dieser Beschreibungen unter dem Einsatz bildgebender Sensoren betrachtet. Die Beschreibung erfolgt auf Basis von Kontaktzuständen zwischen den Werkstücken und ihrer Umgebung. Ausgangspunkt ist eine manuelle Demonstration der Aufgabe in der virtuellen Welt, die ein komplettes, geometrisches Modell der Werkstücke und der Umgebung zu jedem Zeitpunkt der Demonstration enthält. Daraus wird in einem ersten Schritt von den exakten Positionen und Distanzen abstrahiert, indem ein topologisches Kontaktmodell automatisch abgeleitet wird. Im zweiten Abstraktionsschritt wird auch von den Winkeln abstrahiert, indem die Vielzahl möglicher Situationen an einem topologischen Kontakt auf wenige diskrete Kontaktzustände reduziert wird. Die diskreten Kontaktzustände beschreiben dabei implizit die Stabilität des Kontaktzustands, welcher maßgeblichen Einfluss auf das Verhalten des Werkstücks hat. Es können vier unterschiedliche Verhaltensmuster, die mit Klassen von Übergängen zwischen diskreten Kontaktzuständen identifiziert werden, ausgemacht werden. In Analogie zur Handhabung formfester Werkstücke können diese Klassen auch als eine Repräsentation von Basisskills bzw. eines einzelnen Montageschritts angesehen werden. Somit lässt sich aus der Demonstration der Montageaufgabe automatisch ein kontaktbasiertes Montageprogramm ableiten, dessen Schritte Übergänge zwischen diskreten Kontaktzuständen repräsentieren.

Zudem wird die Ausführung solcher Montageprogramme mit Hilfe bildgebender Sensoren mit und ohne Tiefeninformation untersucht. Bildgebende Sensoren können die Kontaktsituation statisch durch ein einzelnes Bild oder die Übergänge über Bildfolgen erfassen. Die Umsetzung des statischen Vorgehens, das in der Regel Tiefeninformation benötigt, mit Tiefenkameras ist beim derzeitigen Stand der Technik nicht praktikabel. Die Überwachung der Ausführung konzentriert sich daher auf das Erfassen der Übergänge. Wegen der situationslokalen Eigenschaften bildgebender Sensoren und der Möglichkeit von der Klasse des Übergangs unmittelbar auf das Verhalten des DLO zu schließen, werden für jede Klasse charakteristische Merkmale und günstige Blickwinkel für diese angegeben, um auf Basis des Montageprogramms eine Sensoreinsatzplanung, deren Notwendigkeit auch der Nachteil situationslokaler Sensoren ist, durchführen zu können. Die Auswertung der gefundenen charakteristischen Merkmale wird mit den Mitteln der Bildverarbeitung realisiert. Hierbei macht sich vor allem beim dynamischen Vorgehen die strukturelle Einfachheit und die Deformation der Werkstücke negativ bemerkbar, da die Merkmalsextraktion durch das Auftreten des starken aperture-Problems stark beeinträchtigt ist. Dennoch können die einzelnen Klassen sensorisch überwacht werden, wie die Versuche zur Validierung der Merkmalsextraktion zeigen.

Abschließend wird die Ausführung einer Montageaufgabe für deformierbare, lineare Werkstücke auf Basis eines durch Anwenden des diskreten Kontaktmodells erstellten Programms und der durch die realisierte Bestimmung der charakteristischen Merkmale möglichen Überwachung mit bildgebenden Sensoren gezeigt.



## Manipulating Deformable Linear Objects Based on Contact States and Vision Sensors

In most cases, industrial robot systems work only with rigid objects. However, manipulation of deformable linear objects (DLOs) such as hoses, wires or leaf springs is desirable, too. The automation level for such deformable linear objects is low. Thus, a systematic approach for assembly tasks including deformable objects is needed. One particular problem is determining the exact shape of a DLO at the start of a manipulation process, since the shape depends on the preceding manipulation steps. Also, due to manufacturing tolerances, the shape of each individual DLO may differ. During the manipulation, the shape of the DLO changes due to gravity and contact forces. Therefore, sensors should be used to compensate for such uncertainties.

The objective here is a systematic approach for the handling of deformable linear object in assembly tasks. The work pieces are assumed to be deformable linear objects with emphasis on low elastic deformations. Further, the environment is assumed to be polyhedral and rigid. In particular, the description of assembly tasks and the execution of such descriptions using image-guided sensors is regarded. The description is based on contact states between the workpieces and the environment. The starting point is a manual task demonstration in a virtual environment. This virtual environment includes a complete geometric world model of the workpieces and the environment at any time during the assembly task. The contact state model reduces this complete model to a topological contact model by disregarding exact positions and dimensions. Another step transforms the topological contact model to a discrete contact model. The discrete model reduces the high variety of possible topological situations to a few general. Each discrete contact state describes the stability of the related topological and geometrical situations. The stability is the key feature for the behaviour of the workpiece. Here, for different behaviours can be identified and correspond with four classes of transitions between the discrete contact states. Similar to the handling of rigid workpieces, these classes also represent the four basic skills for the manipulation of deformable linear objects. Further, the assembly steps can be represented by such skills or transitions of discrete contact states. All steps conducted from the topological model to the skill level can be done automatically if the geometric model is given. Thus, a contact based assembly program can be derived automatically from the task demonstration.

For the execution of such contact based assembly programs the use of image-guided sensors with and without depth information is investigated. Image-guided sensors may capture the contact situation by a single image or only the transitions by regarding image sequences. In common, the first static approach needs depth information but the current depth cameras can not provide this information with the necessary precision. Thus, the execution supervises mainly the transitions. The situation local property of the sensors and the match of the transitions and the workpiece behaviour grant characteristic features for each class. These features depend from the view of the sensors wherefore the sensor positions and orientations must be planned. Thus, for each feature the different views are investigated and the most suited identified. Based on the contact situation, the orientation and position of the sensors and the suited views the features for the supervision of any assembly step are automatically selected. For the implementation of the characteristic features the simple structure of the regarded workpieces in combination with their shape changes impairs the observation. due to the appearance of the strong aperture problem. However, the experiments made show all four transition classes can be supervised by image-guided sensors.

Finally the contact-based description method is applied to an example of use. Further, this contact-based assembly program is executed using image-guided sensors suchlike that uncertainties in positions and orientation of the environment are compensated by the sensor driven approach.



# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	13
1.1. Motivation.....	13
1.2. Ziele.....	15
1.3. Aufgabenstellung.....	17
1.3.1. Beschreibung von Montageaufgaben.....	17
1.3.2. Sensorgestützte Ausführung.....	17
1.4. Abgrenzung.....	18
1.5. Kapitelübersicht.....	19
2. Stand der Forschung.....	21
2.1. Bildgebende Sensoren.....	21
2.1.1. Grauwert- und Farbkameras.....	21
2.1.2. Tiefensensoren.....	22
2.2. Beschreibung von Montageaufgaben.....	24
2.2.1. Formalismen zur Kapselung der Sensorabhängigkeit.....	24
2.2.2. Kontaktzustandsmodell für formfeste Werkstücke.....	25
2.2.3. Formalismen zur Handhabung von DLO.....	26
2.3. Sensorbasierte Ausführung.....	28
2.3.1. Sensorbasierte Überwachung der DLO-Handhabung.....	28
2.3.2. Visual Servoing.....	30
2.3.3. Merkmale und Merkmalsverfolgung in Bildern.....	31
2.3.4. Segmentierung durch Bewegung.....	32
2.3.5. Sensorpositionierung.....	33
2.4. Folgerungen.....	34
3. Kontaktzustandsmodell für DLO-Montageaufgaben.....	37
3.1. Präzisierung der Aufgabenstellung und Annahmen.....	37
3.1.1. Präzisierung der Aufgabenstellung.....	37
3.1.2. Annahmen bezüglich des Werkstücks.....	37
3.1.3. Annahmen bezüglich der Umgebung.....	38
3.2. Geometrisches Modell.....	38
3.3. Topologisches Kontaktmodell.....	39
3.4. Stabilität von Kontakten.....	43
3.4.1. Die Kontaktkraft.....	43
3.4.2. Stabilitätsklassen.....	44
3.4.3. Bestimmung der Stabilitätsklasse topologischer Kontaktzustände.....	45
3.5. Diskretes Kontaktzustandsmodell.....	49
3.5.1. Diskrete Kontaktzustände.....	49
3.5.2. Diskrete Kontaktsituationen.....	51
3.5.3. Vom topologischen zum diskreten Kontaktzustandsmodell.....	52
3.6. Übergänge zwischen diskreten Kontaktsituationen.....	53
3.6.1. Haupt- und Nebenübergänge.....	53
3.6.2. Klassifizierung der Hauptübergänge.....	55
3.6.3. Annahmen zur Berechnung der Übergangsklassen.....	57
3.6.4. Berechnung der Übergangsklasse.....	58
3.7. Folgerungen.....	61
4. Beschreibung von Montageaufgaben.....	63
4.1. Kontaktbasierte Programmierung.....	63
4.1.1. Kompensation von Unsicherheiten.....	63
4.1.2. Montagebeschreibungen zur DLO-Handhabung.....	64
4.2. Anwendungsbeispiel.....	65
4.2.1. Teilmontage betreffend Öffnung A.....	66
4.2.2. Teilmontage betreffend Öffnung B.....	67
4.2.3. Montageprogramm.....	68

4.3. Folgerungen und Grenzen.....	70
4.3.1. Folgerungen.....	70
4.3.2. Grenzen.....	71
5. Erfassungsmöglichkeiten bildgebender Sensorik.....	73
5.1. Präzisierung der Aufgabenstellung.....	73
5.2. Positionierung bildgebender Sensoren.....	73
5.2.1. Eye-in-hand Konfiguration.....	73
5.2.2. Statische Beobachtungspositionen.....	74
5.2.3. Beleuchtung.....	75
5.2.4. Blickwinkel.....	76
5.3. Erfassung der Werkstücke und der Umgebung.....	77
5.3.1. Räumlicher Erfassungsbereich.....	78
5.3.2. Bildgebende Sensorenmit Tiefeninformation.....	79
5.3.3. Bildgebende Sensorenohne Tiefeninformation.....	82
5.3.4. Einschränkungen des Erfassungsbereichs.....	83
5.4. Folgerungen.....	84
6. Merkmale zum Erkennen von Kontaktzustandsübergängen.....	87
6.1. Die Klasse Kontaktterstellung und Kontaktaufhebung.....	87
6.1.1. Charakteristische Merkmale.....	87
6.1.2. Erfassen der Merkmale in Abhängigkeit der Blickwinkel.....	89
6.1.3. Störeffekte und Gesamtbetrachtung.....	90
6.2. Die Klasse der Punkt/Linienkontaktübergänge.....	91
6.2.1. Charakteristische Merkmale.....	91
6.2.2. Erfassen der Merkmale in Abhängigkeit der Blickwinkel.....	92
6.2.3. Störeffekte und Gesamtbetrachtung.....	93
6.3. Die Klasse der Transienten Übergänge.....	94
6.3.1. Charakteristische Merkmale.....	94
6.3.2. Erfassen der Merkmale in Abhängigkeit der Blickwinkel.....	95
6.3.3. Störeffekte und Gesamtbetrachtung.....	96
6.4. Die Klasse der Spontanen Übergänge.....	97
6.4.1. Charakteristische Merkmale.....	97
6.4.2. Erfassen der Merkmale in Abhängigkeit der Blickwinkel.....	98
6.4.3. Störeffekte und Gesamtbetrachtung.....	99
6.5. Die Klasse der Nebenübergänge.....	100
6.5.1. Charakteristische Merkmale.....	100
6.5.2. Erfassung der Merkmale in Abhängigkeit der Blickwinkel.....	101
6.5.3. Störeffekte und Gesamtbetrachtung.....	102
6.6. Folgerungen.....	102
7. Algorithmische Realisierung.....	105
7.1. Grundlagen zur Segmentierung.....	105
7.1.1. Helligkeitsdifferenzen.....	106
7.1.2. Farbdifferenzen.....	107
7.1.3. Kantendifferenzen.....	108
7.1.4. Tiefendifferenzen.....	109
7.1.5. Gesamtbetrachtung.....	110
7.2. Segmentierung.....	110
7.2.1. Polychrome Segmentierung.....	111
7.2.2. Monochrome Segmentierung.....	113
7.3. Statische Bildanalyse.....	114
7.3.1. Ermittlung von Kontaktbereichen und deren Länge.....	114
7.3.2. Ermittlung der Abdeckung von Umgebungsprimitiven durch das DLO.....	117
7.4. Dynamische Bildanalyse.....	118
7.4.1. Ermittlung großer sprunghafter Änderungen.....	118
7.4.2. Ermittlung der Änderung der Bewegungsrichtung, Bewegungsstart und -Stop ...	120

7.4.3. Ermittlung der Änderung der Geschwindigkeit durch Verfolgen von Extrema.....	120
7.4.4. Pixel-orientierte Ermittlung der Änderung der Geschwindigkeit.....	124
7.4.5. Ermittlung eines Drehpunkts .....	126
7.5. Bildbasierte Übergangserkennung .....	128
7.5.1. Bildaufnahme.....	129
7.5.2. Bildvorverarbeitung.....	129
7.5.3. Segmentierung.....	129
7.5.4. Bestimmung der Merkmale.....	130
7.5.5. Entscheidung.....	131
7.6. Abarbeitung kontaktbasierter Montageprogramme.....	131
7.6.1. Ausführungssystem.....	131
7.6.2. Sensorauswahl .....	132
7.7. Folgerungen.....	134
8. Experimentelle Validierung.....	137
8.1. Experimentalsystem.....	137
8.2. Stabilität der Erkennung bei günstigem Blickwinkel.....	137
8.2.1. Erkennen von Kontakterstellungen/-Aufhebungen.....	139
8.2.2. Erkennen von Punkt/Linien- und Linien/Punkt-Übergänge .....	142
8.2.3. Erkennen transienter Übergänge.....	145
8.2.4. Erkennen spontaner Übergänge.....	148
8.2.5. Folgerungen.....	152
8.3. Einfluss der Blickwinkel.....	153
8.3.1. Blickwinkel zur Ermittlung von Kontaktbereichen und deren Länge.....	154
8.3.2. Blickwinkel zur Ermittlung der Abdeckung von Umgebungsprimitiven.....	154
8.3.3. Blickwinkel zur Ermittlung großer, sprunghafter Änderungen.....	155
8.3.4. Blickwinkel zum Verfolgen von Extrema.....	156
8.3.5. Blickwinkel zum pixel-orientierten Ermitteln von Geschwindigkeitsänderungen.....	157
8.3.6. Blickwinkel für das Merkmal Drehpunkt.....	157
8.4. Ausführung von Montageprogrammen.....	158
8.4.1. Ausführung eines Montagebeispiels.....	158
8.4.2. Kompensation von Unsicherheiten.....	160
8.4.3. Laufzeiten und Parameter der Bildverarbeitung .....	163
8.5. Folgerungen.....	165
9. Zusammenfassung.....	167
9.1. Ergebnis.....	167
9.2. Grenzen und Ausblick.....	170