

Handhabung deformierbarer linearer Objekte: Programmierung mit verschiedenen Manipulation-Skills

Manipulating Deformable Linear Objects: Programming using Different Manipulation Skills

Dipl.-Inform. **A. Schlechter**, Prof. Dr. **D. Henrich**, Universität Kaiserslautern

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt verschiedene Bewegungsprimitive zur Lösung einiger häufig auftretender Probleme bei der Handhabung von deformierbaren linearen Objekten. Anhand der beispielhaften Montage einer Feder wird die Nützlichkeit der verschiedenen Manipulation-Skills im einzelnen, aber auch deren Kombination dargestellt.

Abstract

This paper describes motion primitives which solve some common recurrent problems encountered when manipulating deformable linear objects. As one example for the usefulness of these manipulations skills, the mounting of a leaf spring is presented here.

1 Einleitung

In vielen Produkten findet man Schläuche, Kabel, Blattfedern, deformierbare, lineare Objekte (DLOs) also, welche sich unter anderem durch ihre Nachgiebigkeit, Verformbarkeit und hohe Fertigungstoleranzen auszeichnen. Bei der industriellen Herstellung sind gerade diese Unsicherheiten ein großes Hindernis für die Automatisierung der Fertigungsprozesse. Zwar kann man für spezielle, kleine Aufgaben Lösungen finden, z.B. durch den Einsatz von Spezialwerkzeug oder durch aufwendige Programmierung eines sensorbasierten Systems, es bleibt aber unklar wie diese von Natur aus unflexiblen Speziallösungen auf andere, sogar ähnliche Problemsituationen übertragen werden können.

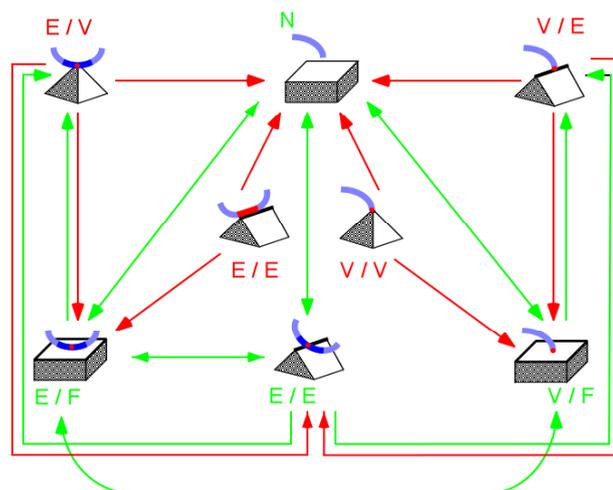


Abb. 1: Alle Zustandsübergänge von Einzelkontakten zwischen einem DLO und seiner konvexen polyedrischen Umwelt. Initiierte Übergänge (schwarz); spontane Übergänge (grau)

Um hier Abhilfe zu schaffen, hat Henrich [1] ein Modell zur formalen Beschreibung von Montageaufgaben mit DLOs entwickelt. Das deformierbare lineare Objekt besteht aus einer Kante (E) und einem freien Ende (V). Die Umgebung setzt sich aus konvexen Polyedern zusammen, diese bestehen aus Ecken (V), Kanten (E) und Flächen (F). Es werden alle möglichen Kontaktzustände zwischen einer DLO-Primitive und einer Hindernisprimitive sowie sämtliche mögliche einzelne Kontaktzustandsübergänge aufgezählt. (Abb. 1).

Für die Handhabung starrer Werkstücke hat Hasegawa [2] das Konzept der Manipulation-Skills eingeführt: *Manipulation-Skills* sind kleine, robuste, sensorbasierte Programme zur Lösung häufig wiederkehrender, klar definierter (Teil-) Aufgaben.

Bei der Realisierung einer beliebigen mittels Kontaktzustandsübergängen beschriebenen Montageaufgabe muss ein Robotersystem mit Fertigungstoleranzen sowie Ungenauigkeiten in der konkreten Greifsituation, mit ungewollten Schwingungen und mit z.T. zielgerichteten Deformationen des Werkstücks umgehen können. Dazu wurde eine Bibliothek mit unterschiedlichen Manipulation-Skills entwickelt, welche diese regelmäßig auftretenden Probleme im einzelnen zu lösen vermögen:

- Sensorgesteuerte Kontaktzustandsübergänge führen, unabhängig von den Ungenauigkeiten einer konkreten Anwendungssituation, einen gewünschten Kontaktzustandsübergang (siehe Abb. 1) zuverlässig durch.
- Sensorgenerierte, schwingungsreduzierende Ausgleichsbewegungen dämpfen ungewollte Schwingungen einer vorausgegangenen Bewegung.
- Deformationsbewegungen bringen ein DLO in die zur Montage notwendige Form.

Die einzelnen Manipulation-Skills werden in Abschnitt 2 vorgestellt und in Abschnitt 3 an einem konkreten Beispiel angewandt.

2 Manipulation-Skills

2.1 Kontaktzustandsübergänge

Während einer Montage soll im nächsten Schritt ein neuer Kontakt erstellt oder ein vorhandener Kontakt geändert bzw. gelöst werden. Gegeben ist neben dem gewünschten Einzelkontaktzustandsübergang (Abb. 1) eine Roboterbewegungsrichtung welche zu diesem Übergang hinführt. Es gilt nun, den Zeitpunkt des Übergangs möglichst ohne Verzögerung zu erkennen. In [3] wurde für jeden möglichen einzelnen Übergang aus Abb. 1 ein Makro implementiert, welches, basierend auf den Erwartungen bzgl. des Verlaufs übergangsspezifischer Kräfte und Momente, den Übergang im realen Kraft-/Momentsensorsignal bestätigt.

Mit dieser vollständigen Bibliothek für Einzelkontaktzustandsübergänge können Montageaufgaben gelöst werden, bei denen die Kräfte und Momente während eines gewünschten Übergangs nicht wesentlich durch bereits geltende Kontaktzustände (z.B. durch Deformation) oder sonstige Störungen (wie z.B. Schwingungen) beeinflusst werden.

2.2 Schwingungsreduzierung

Aus unterschiedlichsten Gründen kann das manipulierte DLO während der Abarbeitung einer Montagesequenz in störende freie oder auch unfreie Schwingungen geraten. Aufgrund der hohen Dauer der Abklingzeit solcher Schwingungen (z.B. >45 sec. für Blattfedern), kann die Gesamtdauer einer Montage durch aktive Schwingungsreduzierung verkürzt werden.

In [4] werden Ausgleichsbewegungen vorgestellt, welche ein beliebig frei schwingendes DLO nach wenigen Schwingungsperioden mit einer einzigen Ausgleichsbewegung stabilisieren. Dabei werden die Amplitude, die Frequenz und die Phase der Schwingung mit Hilfe des in der Handwurzel montierten Kraft-/Momentsensors bestimmt und in die benötigte Ausgleichsbewegung umgesetzt. Die Situation unfrei schwingender DLOs wurde noch nicht näher betrachtet.

2.3 Objektdeformation

Es gibt Situationen in denen deformierbare Werkstücke während der Montage elastisch zurechtgebogen werden müssen. Formal kann man dieses Problem beschreiben durch die Angabe der Kontaktpunkte für die gewünschten Kontaktzustände entlang des DLOs zusammen mit den gewünschten Tangentenrichtungen und eventuellen Verschiebungen in einem oder mehreren Kontaktpunkten. Das entscheidende Problem dabei ist, wie man den bekannten aktuellen Effektpunkt bewegen muss, um die gewünschte Verformung und/oder Verschiebung zu bewerkstelligen. In [5] wird dieses Problem durch Approximation der DLO-Form mittels unterschiedlicher Arten von Splines analysiert. Mit diesem Ansatz kann die benötigte Effektpunktbewegung mit ausreichender¹ Genauigkeit online berechnet werden.

Diese modellbasierten Deformationsbewegungen alleine können aufgrund ihrer Unfähigkeit ihre Umwelt wahrzunehmen natürlich nur Montageaufgaben lösen, bei denen das Erreichen einer bestimmten gewünschten Zielsituationen trotz ungenauer Kenntnis aller Werkstückparameter (Länge, Breite, Dicke, energieminimale Form, Elastizitätsmodul, ...) z.B. durch die geometrische Gesamtsituation erzwungen werden kann.

3 Anwendungsbeispiel

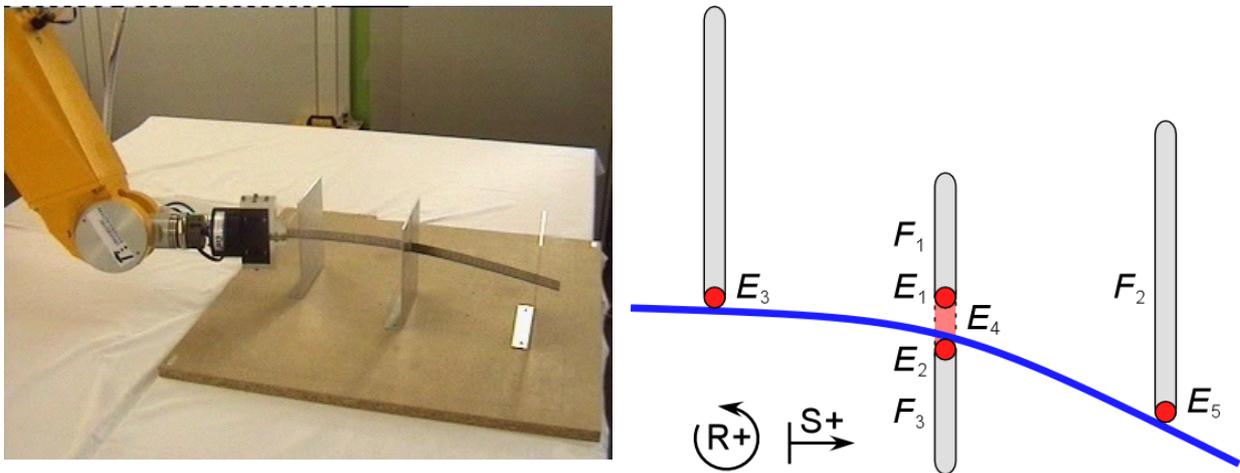


Abb. 2: Zielsituation der Montage: Übersicht (links); Horizontaler Schnitt mit Benennung der in der Montage benötigten Flächen und Kanten, sowie Definition der positiven Rotations- und Translationsrichtung (rechts).

Um die im vorigen Abschnitt beschriebenen Manipulation-Skills und deren Kombination anschaulich darzustellen, betrachten wir folgendes Anwendungsbeispiel: Eine 50 cm lange

¹ Das Beibehalten der gegebenen Kontaktsituation ist in der Realität nicht in jedem Fall garantiert.

und 2 cm breite Blattfeder ist in drei Hindernissen einzuspannen (Abb. 2). Die Hindernisse sind jeweils 19 cm hoch und 15 cm breit. Die Aussparung im mittleren Hindernis ist 6 cm hoch und 1 cm breit. Der Abstand zwischen den Hindernissen beträgt 20 cm (linke Seite) bzw. 22 cm (rechte Seite). Die Hindernisse sind so versetzt, dass ein einfaches Durchschieben ohne Deformation der Feder unmöglich ist.

3.1 Formale Aufgabenbeschreibung

Unter Verwendung der in Abschnitt 1 eingeführten Kontaktzustände und der in Abb. 2 definierten Bezeichnungen lässt sich das Ziel dieser Montageaufgabe durch die Kontaktsituation $E/E_2 \wedge E/E_3 \wedge E/E_4 \wedge E/E_5$ beschreiben. Natürlich lässt sich dieses Ziel auf unterschiedliche Arten formal aus dem Startzustand N erreichen. Wir beschreiben hier einige naheliegende Varianten. Dabei werden in folgender Tabelle die aufgerufenen Manipulation-Skills (courier) mit Parametern (Bewegungsrichtung M , Hindernisbeschreibung, ...) (kursiv) und die dadurch bewirkten Änderungen an der Kontaktsituation (fett) aufgelistet und beschrieben.

CLOSE ()	Zuerst wird die Feder aufgegriffen, und an den Startpunkt X der Montage gebracht. Die durch die schnelle Transferbewegung frei schwingende Feder wird gedämpft.
MOVE (X)	
DAMP ()	
TRANSITION_N_VF ($M_1; F_1; \dots$)	Der Kontakt zwischen der Federspitze und der Fläche F_1 wird erstellt, mit dem Ziel über den spontanen Kontaktverlust an der Kante E_1 den Schlitz zu treffen. ²
$N \rightarrow \mathbf{V/F_1}$	
TRANSITION_VF_VE_N ($M_2; F_1, E_1; \dots$)	
$V/F_1 \rightarrow \mathbf{[V/E_1 \rightarrow N]} \rightarrow \mathbf{E/E_2}$	
TRANSITION_EE_N ($M_3; E_2; \dots$)	Zur späteren, definierten Verbiegung der Blattfeder wird der E/E_1 -Kontakt benötigt: Dieser wird mit den Übergängen $E/E_2 \rightarrow N$ und $N \rightarrow E/E_1$ erreicht.
$E/E_2 \rightarrow \mathbf{N}$	
TRANSITION_N_EE ($M_4; E_1; \dots$)	
$N \rightarrow \mathbf{E/E_1}$	
DEFORM ($E/E_1, R-$)	Durch das Hinzufügen des Kontaktes E/E_3 wird die Orientierung der Feder erreicht. Dies geschieht durch Rotation um E/E_1 unter Beibehalten des Kontaktes E/E_1 .
$E/E_1 \rightarrow E/E_1 \wedge \mathbf{E/E_3}$	
TRANSITION_N_VF ($M_5; F_2; \dots$)	Das zusätzliche Erstellen und anschließende Lösen des Kontaktes V/F_2 beseitigt ggf. die Unsicherheit in der Länge der Feder.
$E/E_1 \wedge E/E_3 \rightarrow E/E_1 \wedge E/E_3 \wedge \mathbf{V/F_2}$	
TRANSITION_VF_N ($M_6; F_2; \dots$)	
$E/E_1 \wedge E/E_3 \wedge \mathbf{V/F_2} \rightarrow E/E_1 \wedge E/E_3$	

² Eine alternative Variante beginnt mit der Kontakterstellung an der Fläche ($N \rightarrow V/F_3$), um über die spontane Kontaktänderung an der gemeinsamen Randkante der Fläche und der Aussparung dieselbe zu finden ($V/F_3 \rightarrow V/E_2 \rightarrow E/E_2$). Diese scheidet wegen zu hoher statischer Reibungskräfte (Federspitze „gräbt“ sich ins Hindernis) aus.

<p>TRANSITION_N_EE ($M_7; E_4; \dots$)</p> <p>$E/E_1 \wedge E/E_3 \rightarrow E/E_1 \wedge E/E_3 \wedge \mathbf{E/E_4}$</p>	<p>Die Erstellung des E/E_4 Kontaktes erfolgt nun bei noch möglichst geringer Reibungskraft an der Kante E_1.³</p>
<p>DEFORM ($E/E_1, R-$)</p> <p>DEFORM ($E/E_1 \wedge E/E_3, S+$)</p> <p>DEFORM ($E/E_1, R+$)</p> <p>$E/E_1 \wedge E/E_3 \wedge E/E_4$</p> <p>$\rightarrow E/E_1 \wedge E/E_3 \wedge E/E_4 \wedge \mathbf{E/E_5}$</p> <p>DEFORM ($E/E_3, R+$)</p> <p>$\mathbf{E/E_1} \wedge E/E_3 \wedge E/E_4 \wedge E/E_5$</p> <p>$\rightarrow E/E_3 \wedge E/E_4 \wedge E/E_5$</p> <p>$\rightarrow \mathbf{E/E_2} \wedge E/E_3 \wedge E/E_4 \wedge E/E_5$</p>	<p>Jetzt lässt sich die Feder durch Deformation leicht im Kontaktpunkt E/E_1 in negativer Richtung drehen und ohne Änderung der Kontaktsituation $E/E_1 \wedge E/E_3$ nach rechts schieben.</p> <p>Beim Zurückdrehen in positiver Richtung im Kontaktpunkt E/E_1 entsteht der Kontakt E/E_5.</p> <p>Weiteres Drehen in positiver Richtung um den Kontaktpunkt E/E_3 lässt den E/E_1 Kontakt verschwinden; schließlich entsteht der Kontakt E/E_2.</p>
<p>OPEN ()</p>	<p>Die gewünschte Zielsituation ist erreicht. Mit dem Öffnen des Greifers ist die Montageaufgabe abgeschlossen</p>

3.2 Ergebnisse

Bei der Implementierung des Anwendungsbeispiels brauchen wir alle drei Manipulation-Skills: Ohne Deformation ist die Montage von vornherein nicht durchführbar, ohne hinreichend genau bekannte Ausgangssituation scheitert die berechnete Deformationsbewegung und damit natürlich die abschließende Einspannung des Lineals, ohne schwingungsreduzierende Ausgleichsbewegung arbeitet die kraftbasierte Übergangserkennung nicht zuverlässig (häufige Früherkennungen).

Die eingesetzte Übergangserkennung basiert auf linearer Regression. Sie arbeitet jeweils mit einer Initialisierungszeit von 5 s vor dem Übergang und mit einer minimalen Verzögerung von 0,1 s zur Erkennung des Übergangs.⁴ Die durchschnittliche Verzögerungszeit bei erfolgreicher Erkennung liegt unter 0,5 s. Der Roboter bewegt sich je nach Übergang mit zwischen 5 und 15 mm/s. Transferbewegungen zwischen zwei Kontaktzustandsübergängen werden mit 100 mm/s, die Deformationsbewegungen mit 10% und die Aufgreifbewegung mit 50% der maximalen Robotergeschwindigkeit gefahren. Die Gesamtausführungszeit liegt bei rund 1 Minute und 40 Sekunden.⁵ Von 25 Experimenten in Serie sind zwei an der Schwingungsdämpfung gescheitert (8%), acht waren erfolgreich obwohl die Aussparung (Übergang $V/F_1 \rightarrow [V/E_1 \rightarrow N] \rightarrow E/E_2$) nicht erkannt wurde (32%),

³ Durch das Einpannen der Feder zwischen den Kanten in den nächsten Arbeitsschritten, steigt natürlich auch die Reibungskraft an den entsprechenden Kanten. Der Übergang hätte aber auch früher eingefügt werden können.

⁴ Die Zeiten sind noch nicht auf schnelle Taktraten optimiert.

⁵ Ein Video des Montagebeispiels ist online unter <http://resy.informatik.uni-kl.de/projects/RODEO/> abrufbar.

gang $V/F_1 \rightarrow [V/E_1 \rightarrow N] \rightarrow E/E_2$) nicht erkannt wurde (32%), die restlichen 15 Experimente wurden ohne jeglichen Fehler beendet (60%).

4 Folgerungen und Ausblick

Wie im Anwendungsbeispiel gesehen, werden alle drei vorgestellten Manipulation-Skills zur sinnvollen Implementierung von durch Kontaktzustandsübergänge beschriebenen Montageaufgaben benötigt. Das Weglassen eines einzelnen macht die Ausführung unzuverlässig bzw. gar unmöglich. Die Programmierung mit Manipulation-Skills ist einfach, flexibel und effizient:

- Für einen gewünschten sensorüberwachten Kontaktzustandsübergang reicht es aus, den betreffenden Skill aufzurufen,
- Für eine gewünschte Objektverformung braucht nicht eine Roboterbewegung sondern nur die Deformation selbst angegeben werden,
- Es bedarf keiner langer Abklingzeiten sondern lediglich kurzer Dämpfungsbewegungen um ein schwingendes Werkstück zu stabilisieren.

Die Einsatzgebiete für diese Art der Programmierung sind aber nicht nur durch die Mächtigkeit des Konzepts sondern auch durch die Zuverlässigkeit der entstehenden Programme bestimmt. Die schrittweise Verbesserung der jeweils schwächsten Manipulation-Skills wird also angestrebt. Darüber hinaus wird aber auch die theoretische Mächtigkeit des Konzeptes durch eine Integration von Deformationsbewegungen und Kontaktzustandsübergängen erhöht werden.

5 Referenzen

- [1] Henrich, D., and Wörn, H. (Eds.): "Robot manipulation of deformable objects", Springer-Verlag, London, 2000, ISBN: 1-85233-250-6
- [2] Hasegawa, T., Suehiro, T., and Takase, K.: "A model-based manipulation system with skill-based execution". In: IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 8, No. 5, pp. 535-544, October 1992.
- [3] Schlechter, A., Henrich, D.: "Manipulating deformable linear objects: characteristics in force signals for detecting contact state transitions". In: 2001 IEEE Int. Conf. On Advanced Robotics (ICAR'01), Budapest, Hungary, August 2001.
- [4] Yue, S., Henrich, D.: "Manipulating deformable linear objects: force/torque sensor-based adjustment-motions for vibration elimination". In: 2001 IEEE Int. Conf. On Advanced Robotics (ICAR'01), Budapest, Hungary, August 2001.
- [5] Schmidt, T. Henrich, D.: "Manipulating deformable linear objects: robot motions in single and multiple contact points". In: 2001 Int. Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP'01); Fukuoka; Japan, May 2001.