

Ein allgemeiner Ansatz zur Montage deformierbarer linearer Werkstücke mit Industrierobotern

Dipl.-Ing. Axel Remde, Dipl.-Inform. Frank Abegg,

Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn, Karlsruhe

Prof. Dr. Dominik Henrich, Kaiserslautern

Zusammenfassung

Diese Arbeit skizziert einen allgemeinen Ansatz zur Montage deformierbarer linearer Werkstücke (wie Kabel, Drähte, Schläuche, Blattfedern) mit Industrierobotern. Hierzu werden insbesondere die folgenden zwei Aspekte betrachtet. Erstens die zuverlässige Ausführung der Montage unter Berücksichtigung der Werkstückdeformation und anderer Unsicherheiten, zweitens die numerische Simulation des Werkstückverhaltens. Zur robusten Ausführung der Montage wird das aus der Montage starrer Werkstücke bekannte Konzept der Manipulation-Skills auf deformierbare Werkstücke übertragen. Bei der numerischen Simulation wird insbesondere die Bestimmung der Greifertrajektorie bei gegebener Aufgabenstellung betrachtet.

Abstract

In this paper, we outline a general approach for assembling deformable linear objects (like cables, wires, hoses or leaf springs) with industrial robots. In this context, the following two aspects are regarded: First, the reliable execution of assembly tasks, taking into account the workpiece deformation and uncertainties, second, the numerical simulation of the object behavior. For the reliable execution, we transfer the concept of Manipulation Skills, which is well-known for the assembly of rigid objects to deformable objects. In the field of simulation, especially the problem of computing the gripper trajectory for a given assembly task is regarded.

1 Einleitung

Neben dem Einsatz von Industrierobotern in der Fertigung und Vormontage, z. B. beim Lackieren und Schweißen, wird dem Robotereinsatz in der Montage zunehmendes Interesse entgegengebracht. In vielen industriellen Einsatzfeldern ist der Automati-

sierungsgrad in diesem Bereich nach wie vor sehr gering, entsprechend groß ist das zukünftige Automatisierungspotential. Während für die Montage starrer Werkstücke bereits eine große Zahl theoretischer wie experimenteller Arbeiten existiert, gibt es nur wenige Vorarbeiten zur automatisierten Montage deformierbarer Objekte. Für einige bestimmte Montageaufgaben sind zwar Lösungen bekannt, die aber auf dem Einsatz von speziell für die jeweilige Aufgabe entwickelten Endeffektoren beruhen. Eine Übertragung auf andere Aufgabenstellungen ist daher nicht möglich. Ebenfalls bekannt sind Arbeiten zu einzelnen Aspekten der Montage deformierbarer Objekte, die jedoch nicht die Montageaufgabe als Ganzes berücksichtigen.

Diese Arbeit stellt einen allgemeinen Ansatz für die Montage deformierbarer linearer Objekte (DLOs) vor. Hierzu zählen zahlreiche typische Werkstücke, wie Schläuche, Blattfedern, Drähte, Kabel, etc. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten vermeidet der hier vorgestellte Ansatz die Verwendung von Spezial-Endeffektoren, was eine einfache Adaption an wechselnde Aufgabenstellungen ermöglicht. Im folgenden werden die robuste Durchführung von Montageaufgaben in unsicheren Umgebungen (Abschnitt 2) und die numerische Simulation des Werkstückverhaltens (Abschnitt 3) betrachtet. Abschnitt 4 verdeutlicht das Zusammenspiel beider Komponenten anhand eines Anwendungsbeispiels.

2 Ansatz zur sensorgestützten Montage

2.1 Manipulation-Skills

Für starre Werkstücke wird die Problematik einer zuverlässigen und effizienten Montage durch Robotersysteme bereits seit etlichen Jahren untersucht. Hasegawa et al. [1] führten das Konzept der Manipulation-Skills ein, auf dem der hier dargestellte Ansatz beruht. Ein *Manipulation-Skill* (MS) ist die robuste Lösung für eine häufig in ähnlicher Form wiederkehrende (Teil-)Aufgabe, wie z.B. „*Schraubenschlüssel ansetzen*“ oder „*Bolzen in Bohrung fügen*“.

Steht eine Reihe verschiedener MS für derartige Operationen einmal zur Verfügung, können diese nach dem Baukastenprinzip zu komplexen Abläufen verknüpft werden, wie Hasegawa et al. am Beispiel einer Ventildemontage demonstrieren. Eine robuste Ausführung wird dadurch gewährleistet, daß Beginn und Ende der einzelnen Roboterbewegungen nicht an feste, offline- (oder per Teach-In) programmierte Greiferpositionen gebunden sind, sondern jeweils durch eine Änderung der Kontaktsituation zwischen gegriffenem Werkstück und Umgebung getriggert werden. Generell beinhaltet jeder MS (mindestens) eine spezifische Änderung der Kontaktsituation vom gegebenen Ausgangszustand zu einem gewünschten Zielzustand. Damit bildet die Betrachtung der Kontaktsituation die Basis dieses Ansatzes.

Eine Übertragung dieses Konzepts auf DLOs erfordert drei Schritte: Erstens müssen die möglichen Kontaktzustände zwischen Werkstück und Umgebung bestimmt werden. Zweitens müssen die Wechsel zwischen diesen Zuständen untersucht werden. Drittens müssen die Zustandswechsel durch geeignete Sensorsysteme zuverlässig detektiert werden.

2.2 Kontaktzustände

In diesem und dem folgenden Abschnitt wird eine kurze Einführung in die Kontaktzustände zwischen einem DLO und einer starren Umwelt gegeben. (siehe Remde et al. [3]).

Der *Kontaktzustand* zwischen zwei Objekten wird durch die den Kontakt formenden geometrischen Primitive beider Kontaktpartner definiert. Für starre Polyeder, die hier zunächst als Umgebung angenommen werden, sind die geometrischen Primitive *Spitzen*, *Kanten* und *Flächen*. Ein DLO besteht im Allgemeinen aus zwei Endpunkten (Spitzen), die durch eine Linie (Kante) verbunden sind. Häufig wird einer der Endpunkte vom Robotergreifer gehalten und kann somit ignoriert werden. Ebenso wie die geometrischen Primitive der Kontaktpartner kann der Kontakt selbst durch seine Dimension beschrieben werden. Die möglichen Kontakte werden also in *Punktkontakte* und *Linienkontakte* eingeteilt.

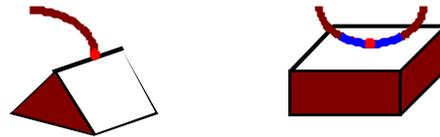


Abbildung 1: Beispiele für Kontaktzustände zwischen DLO und konvexem Polyeder: Spitze-Kante (links) und Kante-Fläche (rechts)

Das wichtigste Charakteristikum eines jeden Kontaktzustandes ist seine Stabilität. Ein Kontaktzustand wird als *stabil* bezeichnet, wenn er sich bei einer (kleinen) Bewegung des Greifers in beliebiger Richtung nicht ändert. Andernfalls ist er *instabil*. Abbildung 1 zeigt als Beispiele einen instabilen Spitze/Kante-Kontakt und einen stabilen Spitze/Fläche-Kontakt.

2.3 Zustandsübergänge

Ausgehend von den möglichen Kontaktzuständen muß untersucht werden, welche Übergänge zwischen diesen möglich sind. Aus der Unterscheidung zwischen stabilen und instabilen Kontaktzuständen folgt auch eine Unterteilung der Zustandsübergänge in zwei Gruppen. *Initiierte Übergänge* gehen von einem stabilen Kontaktzustand aus und führen zu einem stabilen oder instabilen Folgezustand. Ausgelöst (initiiert) werden sie durch eine bestimmte Bewegung des Robotergreifers. *Spontane Übergänge* führen dagegen von einem instabilen Ausgangszustand zu einem stabilen Folgezustand. Sie ergeben sich situationsabhängig und können vom Anwender nicht unmittelbar kontrolliert werden.

Basierend auf einer Analyse der Bedingungen, unter denen die einzelnen Übergänge stattfinden, kann für jeden Übergang von einem gegebenen Ausgangszustand zu einem gewünschten Zielzustand eine geeignete Greifertrajektorie bestimmt werden.

2.4 Detektion von Zustandsübergängen

Wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt, ist die Detektion von Zustandsübergängen für die zuverlässige Ausführung der Montageoperationen von zentraler Bedeutung. Im praktischen Einsatz kommt diesem Aspekt eine Schlüsselrolle zu. Als universelle Sensoren eignen sich insbesondere Bildverarbeitungssysteme sowie Kraft/Momenten-Sensoren (Beispiel in Abbildung 3). Prinzipiell können alle Übergänge mit beiden Sensortypen detektiert werden (Abegg et al. in [2]). Die konkrete Auswahl des Sensorsystems ist von verschiedenen Einflußgrößen abhängig. Zu beachten sind etwa die Steifigkeit des Werkstücks, Reibung, sowie die optischen Eigenschaften von Werkstück und Umgebung.

3 Simulation

Das MS-Konzept zielt insbesondere auf eine zuverlässige Online-Ausführung der Montage unter Unsicherheiten. Dagegen legt es nicht fest, auf welche Weise die nominale Greifertrajektorie (ohne Unsicherheiten) bestimmt wird. Die prinzipiell gegebene Möglichkeit einer Teach-In Programmierung zeigt sich bei der Handhabung deformierbarer Werkstücke als noch langwieriger und schwieriger als in anderen Gebieten. Daher ist zusätzlich ein Werkzeug zur Offline-Programmierung sinnvoll. Bei deformierbaren Werkstücken sind in diesem Zusammenhang zwei Fragestellungen zu unterscheiden.

3.1 Direktes Simulationsproblem

Als *direktes Simulationsproblem* soll eine Problemstellung bezeichnet werden, bei der eine starre Umgebung sowie die Greifertrajektorie gegeben sind. Gesucht wird die sich ergebende Gestalt des deformierbaren Werkstückes (als Funktion der Zeit). Hierzu können verschiedene Berechnungsverfahren eingesetzt werden, z. B. die Minimierung der potentiellen Werkstückenergie (statische Berechnung) bzw. eine Lösung der Euler-Lagrange-Gleichungen (dynamische Berechnung). Entsprechende Rechenalgorithmen sind aus der Literatur bekannt.

3.2 Inverses Simulationsproblem

Als *inverses Simulationsproblem* soll eine Aufgabenstellung bezeichnet werden, bei der eine starre Umgebung sowie eine Manipulationsaufgabe gegeben sind. Gesucht wird eine geeignete Greifertrajektorie, welche die sich aus der Aufgabenstellung ergebenden Anforderungen an die Werkstückform erfüllt. Die Lösung des inversen Simulationsproblems bildet also die Grundlage für eine Offline-Programmierung des Roboters. Im Gegensatz zum direkten wird das inverse Simulationsproblem in der Literatur bisher nicht systematisch betrachtet (Remde et al. in [2]).

4 Anwendungsbeispiel

In diesem Abschnitt soll die Nutzung von Kontaktzuständen und der numerischen Simulation des Werkstückverhaltens anhand einer Montageaufgabe aufgezeigt werden. Betrachtet wird die Montage einer Blattfeder in ein Chassis gemäß Abbildung 2. Zunächst wird die rechte Seite der Blattfeder mit Hilfe eines Ω -Clips montiert, hierzu besitzen Feder und Chassis je eine entsprechende Bohrung. Anschließend wird das linke Ende in einen Winkel eingelegt, wodurch sich eine Fixierung mit variabler Orientierung ergibt.

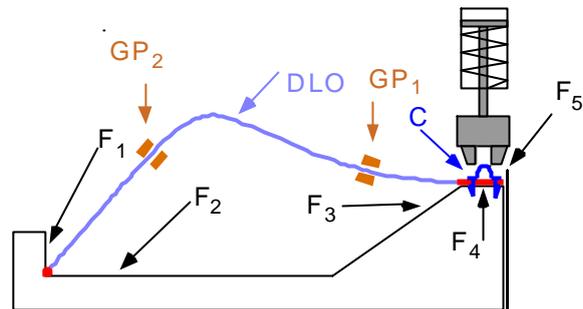


Abbildung 2: Zweiseitige Montage einer Blattfeder. DLO: Blattfeder (Werkstück); C: Ω -Clips; $F_1 \dots F_5$: Flächen des Gegenstückes; GP_1, GP_2 : Greiferpositionen

Zur Durchführung der Gesamtaufgabe sind die folgenden Schritte erforderlich:

1. Montieren der rechten Seite
2. Umgreifen
3. Montieren der linken Seite.

Zum Befestigen der Feder mit einem Ω -Clip müssen die Bohrungen in Chassis und Feder fluchten. Daher wird die Montage der rechten Federseite wie folgt vorgenommen. Zunächst wird das Federende auf die ausreichend große Chassisfläche F_3 aufgesetzt. Anschließend wird der Greifer so bewegt, daß der Kontaktpunkt zwischen Blattfeder und Gegenstück über die Kante zwischen den Flächen F_3 und F_4 auf F_4 überwechselt. Im Anschluß daran wird der Greifer parallel zu F_4 weiterbewegt, bis die Blattfeder an den Winkel F_5 anstößt. Damit sind die Bohrungen zentriert und der Clip kann durch eine Hilfsvor-

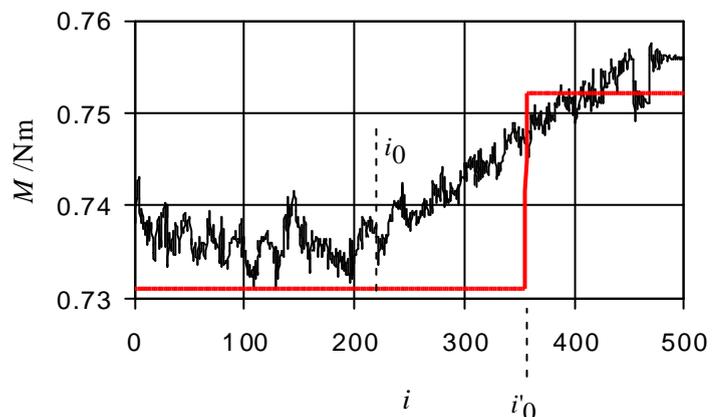


Abbildung 3: Betrag M des Momentenvektors bei einer Zustandsfolge Spitze/Fläche @ Spitze/Kante @ Spitze/Fläche, zusammen mit dem Triggersignal der Übergangsdetektion als Funktion des Meßwert-Index i . (i_0 : Zustandsübergang; i'_0 : Übergangsdetektion)

richtung gesetzt werden. Das Wechseln der Kontaktfläche von F_3 nach F_4 entspricht dabei einer Zustandsfolge Spitze/Fläche \rightarrow Spitze/Kante \rightarrow Spitze/Fläche. Bei Kenntnis der Übergangsbedingungen läßt sich eine geeignete Trajektorie in der Simulation direkt offline bestimmen. Zusätzlich kann mit Hilfe des Simulationssystems der Einfluß verschiedener

Faktoren (z. B. Dicke der Blattfeder) auf die Zuverlässigkeit der Ausführung untersucht werden. Die Detektion der auftretenden Zustandsübergänge erfolgt hier durch einen Kraft/Momenten-Sensor. Abbildung 3 zeigt den Betrag des gemessenen Momentes und das hieraus generierte Triggersignal zur Trennung der Bewegungsphasen (bzw. MSs).

Vor der Montage des linken Federendes ist zunächst ein Umgreifen zu einer Position näher am linken Ende der Feder erforderlich. Die erforderliche Position und Orientierung des Greifers kann für einen beliebigen gewünschten Abstand zwischen Federende und Greifpunkt im Simulationssystem bestimmt werden.

Die anschließende Montage des linken Federendes erfolgt ebenfalls durch eine Reihe von Kontaktzuständen: Das Federende wird zunächst auf Fläche F_2 aufgesetzt und anschließend unter Sicherstellung eines ausreichenden Anpreßdruckes nach links bewegt, bis die Bewegung durch Kontakt mit Fläche F_1 gestoppt wird. Die Detektion erfolgt wiederum kraftbasiert.

5 Folgerungen und Ausblick

Wie im Anwendungsbeispiel im letzten Abschnitt dargestellt, ist die Programmierung von Montageoperationen recht einfach möglich, sofern die entsprechenden MS zur Realisierung der Teilaufgaben zur Verfügung stehen.

Die Grenzen dieses Konzepts liegen einerseits in der unter Umständen schwierigen Detektion der Zustandsübergänge und andererseits in häufig auftretenden unerwünschten Werkstückdeformationen. Gegebenenfalls ist es sinnvoll, den hier vorgeschlagenen Ansatz mit dem Einsatz von Spezialwerkzeugen und Vorrichtungen zu kombinieren.

Eine ergänzende Simulation des Werkstückverhaltens ist insbesondere zur Grobplanung der Roboterbewegung vorteilhaft.

Zur weiteren Untersuchung werden derzeit MS auf Grundlage verschiedener Sensorsysteme entwickelt sowie die Anwendung des vorgeschlagenen Konzeptes auf industrielle Montageprobleme untersucht.

Referenzen

- [1] Hasegawa, T., Suehiro, T., 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, Oct. 1992.
- [2] Henrich D., und Wörn, H. (Herausgeber): „Robot Manipulation of Deformable Objects“. Veröffentlicht bei Springer-Verlag, London, Frühjahr 2000.
- [3] Remde, A., Henrich, D., and Wörn, H.: "*Manipulating deformable linear objects: Contact state transitions and transition conditions*". In: Proc. 1999 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'99), pp. 1450-1455 Oct. 1999, Kyongju, Korea.