

Handhabung deformierbarer linearer Objekte: Vergleich zwischen kraft- und bildbasierter Erkennung von Kontaktzustandsübergängen

Manipulating deformable linear objects: A comparison between force- and vision-based detection of contact state transitions

A. Schlechter, J. Acker, D. Henrich, Universität Bayreuth
E-Mail: dominik.henrich@uni-bayreuth.de, <http://ai3.inf.uni-bayreuth.de>

Kurzfassung

Für die robotergestützte Handhabung von deformierbaren Objekten ist der Einsatz von Sensoren unverzichtbar. Ausgehend von einem Anwendungsbeispiel und konkreter Sensoren werden prinzipielle Unterschiede zwischen kraft- und bildbasierter Erkennung von Kontaktzustandsübergängen diskutiert. Aus diesen Unterschieden wird eine Klassifikation von beliebigen Sensoren in situationslokale und situationsglobale Sensoren abgeleitet.

Abstract

Robot based handling of deformable objects requires the use of sensors. Starting from a sample application, the fundamental differences between force- and vision-based recognition of contact state transitions are discussed. From these, a more general classification of sensors into situation-local and situation-global sensors is derived.

1. Einleitung

In vielen Produkten findet man Schläuche, Kabel, Blattfedern, also deformierbare, lineare Objekte (DLOs), 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 aufwändige Programmierung eines sensorbasierten Systems, es bleibt aber unklar wie diese von Natur aus unflexiblen Speziallösungen auf andere, sogar ähnliche Problemsituationen übertragen werden können.

Für die Handhabung starrer Werkstücke gibt es wiederverwendbare, allgemeine Lösungsansätze zum Umgang mit Unsicherheiten. Ein Beispiel ist das von Hasegawa [2] eingeführte

Konzept der Manipulation-Skills. *Manipulation-Skills* sind kleine, robuste, sensorbasierte Programme zur Lösung häufig wiederkehrender, klar definierter (Teil-) Aufgaben.

Henrich [1] hat das Konzept der Manipulation-Skills übernommen und auf deformierbare lineare Objekte übertragen. Zuerst werden die Ziele und Zwischenziele einer Handhabungsaufgabe mit Hilfe von Kontaktzuständen beschrieben. Kontaktzustände geben an, welche Teile von Objekten miteinander in Kontakt stehen. Dabei wird ein DLO mit einem freien Ende modelliert als eine Ecke (V) die über eine Kante (E) mit dem Greifpunkt verbunden ist. Alle anderen Objekte sind polyedrisch und können durch ihre Ecken (V), Kanten (E) und Flächen (F) beschrieben werden. Der spezielle Zustand ohne Kontakt zwischen DLO und Umgebung heißt N. Eine Menge von gleichzeitig geltenden Kontaktzuständen wird im folgenden Kontaktsituation genannt und als Konjunktion der einzelnen Kontaktzustände geschrieben (z.B. $E/E_1 \wedge E/E_2$). Eine Lösung einer Handhabungsaufgabe kann damit als Folge von nacheinander zu erreichenden Kontaktsituationen beschrieben werden (z.B. $N \rightarrow E/E_1 \rightarrow E/E_1 \wedge E/E_2$). Eine endliche Menge von Manipulation-Skills soll jeweils ausgehend von einer gegebenen Startsituation eine gewünschte Zielsituation zuverlässig erreichen. Die zentrale Grundmenge an Skills basiert auf den prinzipiell möglichen so genannten Einzelkontaktzustandsübergängen zwischen jeweils einzelnen Kontaktzuständen.

Die Erkennung von Einzelkontaktzustandsübergängen wurde von mehreren Forschern auf Basis von Kraft- und von Bilddaten untersucht [1, 3, 4]. Diese Arbeit erläutert die sensorbedingten Beschränkungen bei der Erweiterung der zur Zeit verfolgten Ansätze auf Kontaktzustandsübergänge zwischen allgemeinen Kontaktsituationen. Darüber hinaus wird aus diesen Beschränkungen eine allgemeine Klassifikationsmöglichkeit für Sensoren zur kontaktzustandsbasierten Handhabung abgeleitet. Abschnitt 2 stellt ein Anwendungsbeispiel vor, das als Grundlage der folgenden Diskussion dient. Dabei wird in Abschnitt 3 die Kraft- / Momentsensoren und in Abschnitt 4 die bildgebende Sensoren untersucht. Die in diesen beiden Abschnitten aufgezeigten unterschiedlichen Eigenschaften werden in Abschnitt 4 abschließend zu einem allgemeineren Klassifikationsschema weiterentwickelt.

2. Anwendungsbeispiel

Zur besseren Veranschaulichung der prinzipiellen Unterschiede zwischen verschiedenen Sensoren werden diese anhand eines Anwendungsbeispiels diskutiert (Abbildung 1). Dabei soll das Verlegen eines Schlauchs entlang der drei Kanten E_1 , E_2 und E_3 betrachtet werden. Das Endziel der Montage kann durch die Kontaktsituation $E/E_1 \wedge E/E_2 \wedge E/E_3$ beschrieben werden, da der Schlauch in der Zielsituation an drei Punkten in Kontakt mit Kanten von Objekten der Umgebung steht. Dieses Ziel kann durch zwei aufeinander folgende, zueinander senkrecht stehende Roboterbewegungen erreicht werden. Die erste Bewegung (im

Bild nach rechts) erstellt den Kontakt an der mittleren Kante E_2 und unmittelbar danach zusätzlich den Kontakt an der hinteren Kante E_1 . Die zweite Bewegung (im Bild nach unten) fügt schließlich den Kontakt mit der vordersten Kante E_3 hinzu.

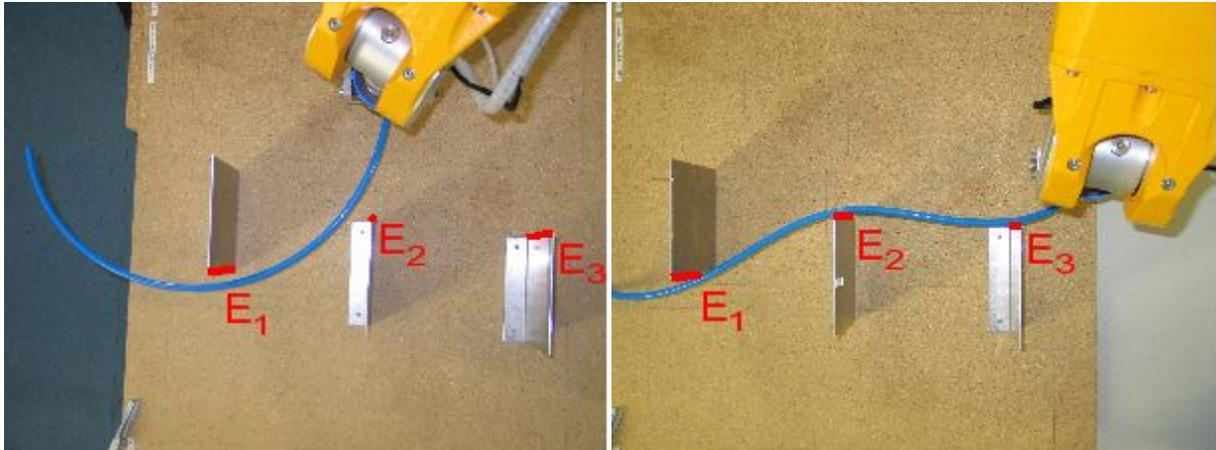


Abbildung 1: Verlegen eines Schlauchs ausgehend von der Startsituation N (links) an drei Kanten entlang zur Zielsituation $E/E_1 \wedge E/E_2 \wedge E/E_3$ (rechts)

Es werden also nacheinander drei gleichartige Kontakte erzeugt, deren Erstellung mit den verfügbaren Sensoren erkannt werden muss.

3. Verwendung von Kraft- / Momentsensoren

Kraft- / Momentsensoren werden in der Regel direkt am Roboter greifer montiert. Gemessen werden daher immer alle auf den Greifer ausgeübten Kräfte und Momente. Hat der Roboter ein hauptsächlich elastisch deformierbares Objekt, beispielsweise einen Schlauch aus Polyamid, gegriffen, so wird die resultierende Kraft und das resultierende Moment der Schwerkraft direkt gemessen. Wird der Roboter bewegt, so kommen Trägheits- und Reibungskräfte dazu. Zusätzlich können am Greifer auch alle durch die Kontaktsituation wirkenden Kontaktkräfte gemessen werden, da sie vom gegriffenen Objekt auf den Greifer übertragen werden. Insbesondere bewirkt die durch die Kontaktsituation entstehende Verformung des deformierbaren Objektes messbare Kräfte und Momente. Ein Kraft- / Momentsensor liefert also immer ein globales Bild einer vorliegenden Kontaktsituation, da die gemessenen Kräfte bzw. Momente immer eine Summe aller wirkenden Teilkräfte bzw. Teilmomente sind.

Die im vorliegenden Anwendungsbeispiel gemessenen Kräfte und Momente sind in Abbildung 2 dargestellt. Dabei sind nur die jeweils für die Übergänge relevanten Ausschnitte aus dem Verlauf der Normen von Kraft und Moment in Abhängigkeit der Distanz d des Roboter greifers zur Startposition der jeweiligen Bewegung abgebildet. Die erste Roboterbewegung ist links dargestellt, der erste Übergang liegt bei etwa $d = 32\text{mm}$, der zweite bei etwa $d = 46\text{mm}$. Die zweite Roboterbewegung ist rechts dargestellt. Hier liegt der Übergang bei

etwa $d = 79\text{mm}$. Alle drei Übergänge sind im wesentlichen jeweils $N \rightarrow E/E$ Übergänge, dennoch sehen sie dreimal anders aus. Der erste Übergang ist ein reiner Einzelübergang $N \rightarrow E/E$ ohne Störeinflüsse. Er ist deutlich am Knick im bis zum Übergang konstanten Kraft- und Momentverlauf zu erkennen. Der zweite Übergang wird offensichtlich durch den bereits existierenden Kontakt beeinflusst. Er zeigt sich als Knick im Anschluss an einen leicht gekrümmten ansteigenden Verlauf von Kraft und Moment. Der dritte Übergang ist klar als Sprung im Kraft- und als Delle im Momentverlauf zu erkennen. Allerdings wird der Verlauf vor dem dritten Übergang durch die existierende Kontaktsituation auf recht komplizierte Weise beeinflusst. Die Erkennung eines allgemeinen $N \rightarrow E/E$ Übergangs muss also mit den globalen Auswirkungen einer bereits vorhandenen Kontaktsituation zurecht kommen.

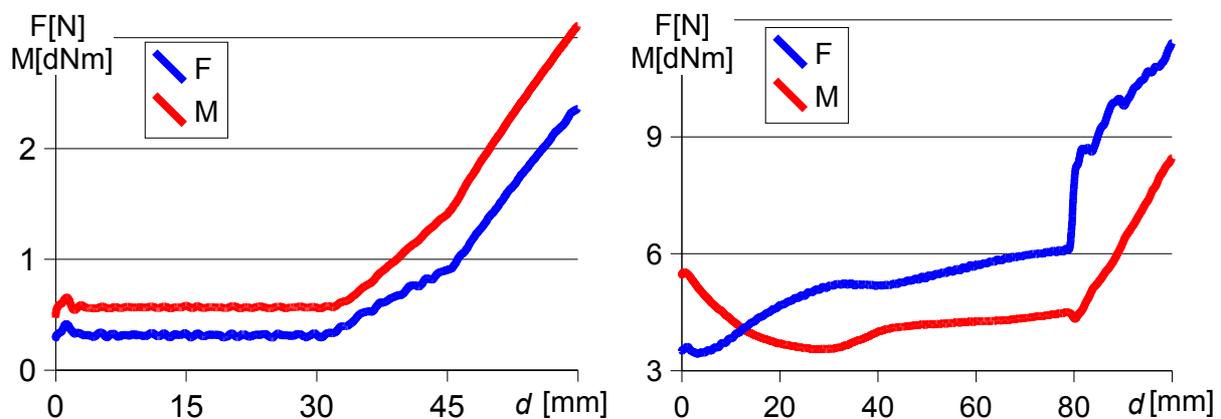


Abbildung 2: Norm von Kraft F und Moment M in Abhängigkeit des Abstands d zur jeweiligen Startposition des Roboters. Links: Übergang $N \rightarrow E/E_2$ etwa bei $d = 32\text{mm}$ und Übergang $E/E_2 \rightarrow E/E_1 \wedge E/E_2$ etwa bei $d = 46\text{mm}$. Rechts: Übergang $E/E_1 \wedge E/E_2 \rightarrow E/E_1 \wedge E/E_2 \wedge E/E_3$ etwa bei $d = 79\text{mm}$.

Die größte Schwierigkeit bei der kraftbasierten Erkennung von allgemeinen Kontaktzustandsübergängen liegt also darin, kontaktsituationsabhängig auf einzelne Teilkräfte und Teilmomente der gemessenen Resultierenden von Kraft und Moment zu schließen. Konkret müssen für die Erkennung eines speziellen Kontaktzustandsübergangs die von diesem verursachten Kräfte und Momente von den restlichen, durch die gesamte Kontaktsituation verursachten, Kräften und Momenten getrennt werden. Es ist daher immer die gesamte Kontaktsituation zu betrachten.

4. Verwendung von bildbasierten Sensorsystemen

Bildgebende Sensoren wie die hier eingesetzte Kamera(s) besitzen egal, ob sie am Roboterarm oder stationär im Arbeitsraum des Roboters angebracht sind, immer nur einen bestimmten Sichtbereich, so dass im allgemeinen nicht die gesamte Kontaktsituation stets von der Kamera beobachtet wird. Dies ist aber auch nicht notwendig, da ein Kontaktzustandsüber-

gang durch ausschließliche Beobachtung des Bereichs der Gesamtszene, in dem er zu erwarten ist, erkannt werden kann, wie im folgenden gezeigt wird.

Die drei Bildfolgen aus Abbildung 3 zeigen jeweils einen der drei $N \rightarrow E/E$ Kontaktzustandsübergänge, wobei jeweils vier nacheinander aufgenommene Bilder, zwei vor, eins an und eins nach dem Übergang, überlagert wurden, um den zeitlichen Verlauf zu veranschaulichen. Da sich die Positionen des Schlauchs in den einzelnen Momentaufnahmen teilweise gegenseitig verdecken, ist der Verlauf des Schlauchs für jeden der vier überlagerten Zeitpunkte zusätzlich durch eine Linie markiert. Die beiden ersten Momentaufnahmen, die weiß gepunktete und die schwarz gestrichelte Linie, verdeutlichen die initiale Bewegung des DLO. Die fein gestrichelte schwarze Linie zeigt die Momentaufnahme des Übergangs. Die letzte Momentaufnahme ist weiß durchgezogen und zeigt das Verhalten des DLO nach dem Übergang. Zusätzlich ist die Bewegungsrichtung des Robotergreifers durch einen Pfeil dargestellt.

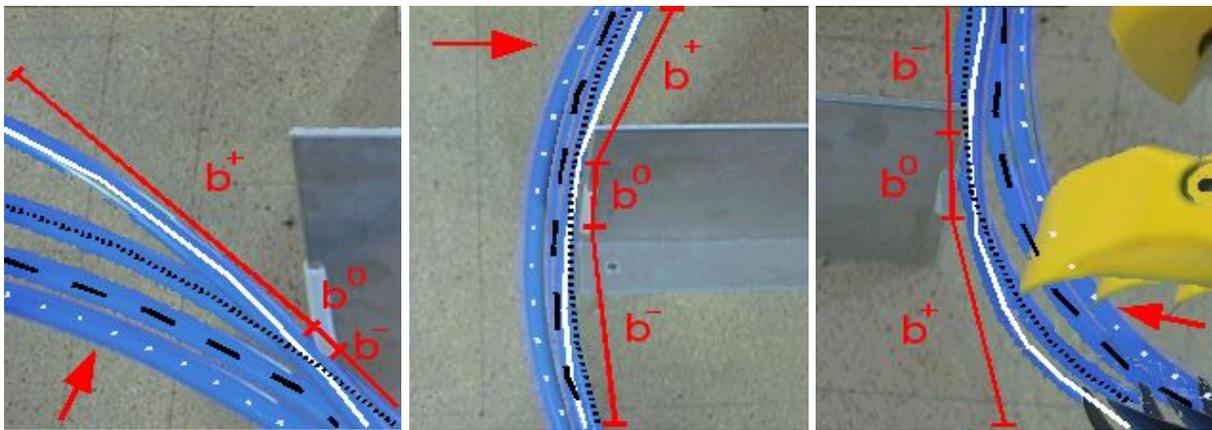


Abbildung 3: Bildsequenzen bei Kontaktstellungen an E_1 (links), E_2 (Mitte) und an E_3 (rechts). Der Schlauch ist in jedem der vier jeweils dargestellten Zeitschritte zur besseren Unterscheidung mit Linien markiert. Der Pfeil gibt die Bewegungsrichtung des Robotergreifers an.

Ein Übergang der Art $N \rightarrow E/E$ oder überhaupt eine beliebige zu einer Deformation führende Kontaktstellung $N \rightarrow X$, wobei X eine beliebige Kontaktsituation ist, ist letztlich immer eine Kollision eines Teils des DLOs mit einem Objekt der Umgebung. Dies bedeutet, dass der kollidierende Teil des DLO durch ein Hindernis aufgehalten wird und so zum Stillstand kommt. Dieser Stillstand ist in den Bildfolgen von Abbildung 3 durch den mit b^0 gekennzeichneten Bereich markiert. Die Erstellung eines E/E -Kontakts zeichnet sich außerdem dadurch aus, dass das Teilstück des DLO zwischen Robotergreifer und Kontaktpunkt sich weiter in die durch den Roboter vorgegebene Richtung bewegt (Bereich b^+), während das Teilstück ab Kontaktpunkt in Richtung freier DLO-Endpunkt sich nach der Kontaktstellung in entgegengesetzter Richtung weiterbewegt (Bereich b^-). In [4] werden solche charakteristische Merkmale für Kontaktzustandsübergänge aufgeführt. Diese Merkmale beziehen sich immer

lokal auf die nähere Umgebung eines interessierenden Kontaktpunktes. Damit sind diese Merkmale unabhängig von der vollständigen Kontaktsituation und ermöglichen so eine uniforme Erkennung von Kontaktzustandsübergängen bei beliebigen Kontaktsituationen.

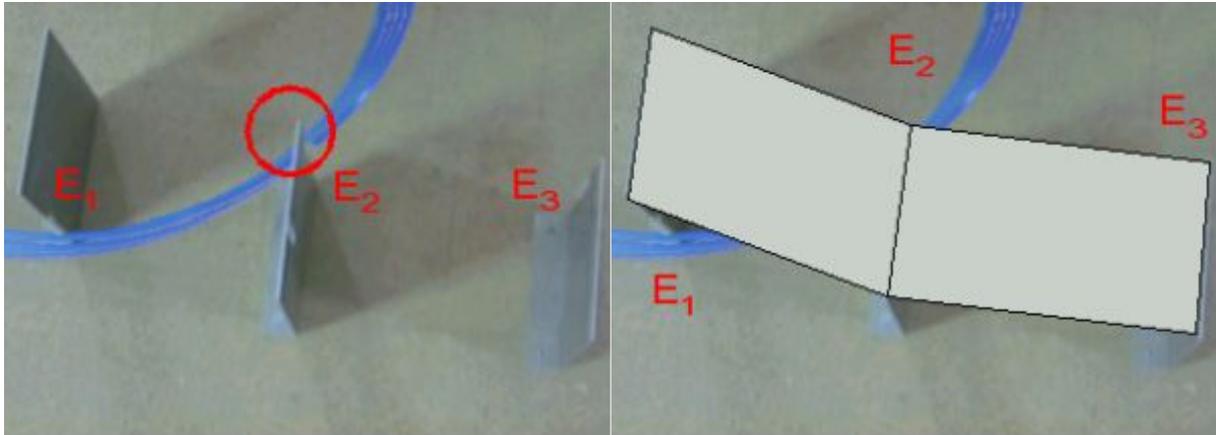


Abbildung 4: Die linke Abbildung zeigt die Erstellung des ersten Kontakts von einer Kameraposition, aus der prinzipiell alle Kontaktzustandsübergänge dieser Montage beobachtet werden können. Der rechte Teil zeigt eine durch Abdeckplatten modifizierte Situation, die die Kamerapositionierung erheblich erschwert.

Die Bildfolgen aus Abbildung 3 zeigen daher auch immer nur den relevanten Ausschnitt der gesamten Kontaktsituation. Sie wurden von drei unterschiedlichen Kamerapositionen aufgenommen, die speziell zur guten Beobachtung dieser Kontaktzustandsübergänge gewählt wurden. Somit sind aber zur Durchführung dieser kurzen Montagesequenz entweder drei stationäre Kameras oder eine bewegliche Kamera mit frei einstellbarem Fokus notwendig, um diese guten Beobachtungspositionen realisieren zu können. Zur Reduktion dieses Aufwands kann die Kamera auch wie in Abbildung 4 (links) gezeigt positioniert werden, wodurch sie die gesamte Situation überblicken kann. Allerdings ist jetzt einerseits die Auflösung schlechter (das Kabel im Bild ist undeutlicher zu sehen), wodurch die Erkennung erschwert wird. Andererseits wird der eigentliche Kontaktbereich des E/E₂ Kontakts durch das Umgebungsobjekt selbst verdeckt (Markierungskreis), so dass in der Bildfolge keine direkte Kollision (b^0) sondern nur die Änderung der Bewegungsrichtung (b^+, b^-) sichtbar ist. Eine Positionierung der Kamera wie in Abbildung 1 kann dieses Problem hier zwar lösen, aber im allgemeinen kann die Existenz genau einer Kameraposition, mit der alle Kontaktzustandsübergänge einer Montage beobachtet werden können, nicht garantiert werden. Dies wird in Abbildung 4 (rechts) nochmals verdeutlicht. Die hier eingezeichneten gedachten Abdeckplatten verhindern die Existenz eines solchen Beobachtungspunktes. Insbesondere die Kontakterstellung an den Kanten E₁ und E₂ ist von einer gemeinsamen Position kaum beobachtbar. Dies gilt auch für eine direkt an dem Roboterarm montierte Kamera.

Insgesamt ist bei der bildbasierten Erkennung von beliebigen Kontaktzustandsübergängen die Erkennung unabhängig von der Gesamtsituation möglich, da die Merkmale lokal am Kontaktpunkt auftreten. Allerdings müssen sie für eine optimale Erkennung auch dort beobachtet werden, was aber bedingt durch die Geometrie der Gesamtsituation nicht immer möglich ist. In der Regel ergibt sich hiermit eine zusätzliche Optimierungsaufgabe, da die bestmöglichen Kamerapositionen gefunden werden müssen unter Berücksichtigung der Anzahl und Einstellmöglichkeiten der verfügbaren Kameras.

5. Schlussfolgerung und zukünftige Forschung

In den Kapiteln 3 und 4 wurden jeweils aufbauend auf dem Anwendungsbeispiel die Eigenschaften von Kraft- / Momentsensoren und von bildgebenden Sensoren für die Durchführung von mittels Kontaktsituationen beschriebenen Montagen deformierbarer linearer Objekte diskutiert. Diese Eigenschaften lassen sich zu einem Klassifikationsschema verallgemeinern. Dabei ergibt sich eine Klassifikation der einsetzbaren Sensoren in situationslokale und situationsglobale Sensoren. Ein *situationslokaler* Sensor ist ein Sensor, der in der Lage ist, Information ausschließlich über den Ausschnitt der Gesamtsituation zu liefern, der für einen Kontaktzustandsübergang relevant ist. Daneben erfasst ein *situationsglobaler* Sensor immer gleichzeitig die gesamte vorliegende Kontaktsituation. Der Nachteil von situationsglobalen Sensoren wie Kraft- / Momentsensoren ist, dass die Erkennungsalgorithmen immer die Gesamtsituation berücksichtigen müssen, so dass das Erkennen von bestimmten Kontaktzustandsübergängen in beliebigen Kontaktsituationen schwierig ist. Dafür genügt ein einziger Sensor, mit dem prinzipiell alle möglichen Kontaktzustandsübergänge zur Durchführung einer Montage erkannt werden können, ohne dass es „tote Winkel“ oder ähnliches gibt. Genau dies ist der Nachteil von situationslokalen Sensoren wie beispielsweise Kameras. Hier wird für eine optimale Erkennung eigentlich je ein Sensor für jeden Kontaktpunkt benötigt. In speziellen geometrischen Situationen ist es möglich, dass überhaupt keine direkte Beobachtungsmöglichkeit existiert, wodurch die Einsatzmöglichkeiten situationslokaler Sensoren eingeschränkt werden. Der Vorteil ist aber, dass ausgehend von einer optimalen Sensorpositionierung ein Übergang zuverlässig in jeder beliebigen Kontaktsituation erkannt werden kann.

Da die Vor- und Nachteile der beiden Sensorklassen zueinander genau gegensätzlich sind, ergänzen sie sich in idealer Weise. Eine Fusion ist somit eindeutig vielversprechend. Für die Ausführung beliebiger Montageoperationen ist eine solche Fusion wahrscheinlich sogar notwendig. Dabei ist jedoch offen, auf welcher Abstraktionsstufe des Verarbeitungsprozesses der Sensordaten die Fusion anzusiedeln ist.

6. Literatur

- [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] Acker, J., Henrich, D.: "Manipulating deformable linear objects: Characteristic Features for Vision-Based Detection of Contact State Transitions". In 2003 IEEE Int. Symp. On Assembly and Task Planning (ISATP'03), Besançon, France, July 2003