

# Objektuntersuchung durch feinfühliges Tasten

Christian Koch

Universität Karlsruhe (TH)  
Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik  
76131 Karlsruhe

Sommersemester 2002

*In dieser Seminararbeit werden zunächst die grundsätzlichen Verfahren und Probleme der haptischen Objektuntersuchung beschrieben. Anschließend werden einige spezielle Systeme erläutert und verglichen. Es wird dabei sowohl auf Sensoren zur Erkennung kleiner Objektmerkmale als auch auf Verfahren zur Erkennung von Objekten im Ganzen eingegangen.*

## 1 Einleitung

Bei der Konstruktion und Programmierung von Robotern wird häufig versucht, sich die Mechanismen, die sich in der Natur im Laufe der Zeit entwickelt und bewährt haben, zu imitieren. Stößt ein Mensch auf einen ihm unbekanntem Gegenstand, versucht er im Allgemeinen diesen durch Ertasten und Erfühlen zu „erkunden“. Eine rein visuelle „Objektuntersuchung“ liefert ihm lediglich Informationen über Form und Oberflächenstruktur des Objekts, ein Ertasten gibt darüber hinaus auch noch Aufschlüsse über Verformbarkeit, Temperatur und unter Umständen sogar über das Gewicht.

Ein Beispiel hierfür ist das Ertasten von Obst oder Gemüse zur Bestimmung des Reifegrades. Hier liefert erst ein Ertasten die gewünschten Informationen über die Verformbarkeit. Außerdem läßt sich z.B. die Oberflächenstruktur eines Gegenstandes häufig haptisch besser und genauer als nur rein visuell bestimmen. Deutlich wird dies z.B. bei Textilien, die von den meisten Menschen erst angefasst werden müssen bevor sie über den Stoff genauere Aussagen machen können.

Die Robotik versucht nun, dieses Verhalten nachzuahmen. Man erhofft sich dadurch, dass sich Roboter - ähnlich wie Menschen - durch eben dieses Ertasten von Objekten ein genaueres Bild von ihrer Umwelt machen können.

Ein weiterer Vorteil dieses Vorgehens ist, dass sich hierdurch eine gewisse Form von Redundanz hinsichtlich der verfügbaren Sensordaten des Roboters ergibt. Beschränkt man sich ausschließlich auf visuelle Informationen ergeben sich beispielsweise erhebliche Probleme in staubigen oder nebligen Umgebungen. Auch eine schlechte Beleuchtung kann zu Problemen führen. Verfügt der Roboter jedoch zusätzlich auch über haptische Sensoren lassen sich unter Umständen Teile dieser Informationsverluste ausgleichen.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei Greifvorgängen das Objekt gerade im Moment des zugreifens von optischen Sensoren oft nicht mehr erfasst werden kann, da es verdeckt ist. Hier liefern haptische Sensoren wertvolle Informationen.

Einsatzgebiete für derart ausgestattete Systeme ergeben sich also besonders dort, wo die Arbeitsumgebung unbekannt ist und somit ein hoher Grad an Autonomie des Roboters erforderlich ist. Haptische Sensoren sind aber auch dann von besonderer Bedeutung, wenn Arbeiten bzw. Manipulationen an Objekten durchgeführt werden sollen. Beispiele hierfür finden sich vor allem in Bereichen, in denen Maschinen Aufgaben übernehmen, die zwar einen relativ hohen „Schwierigkeitsgrad“ haben, von Menschen aber aus Kosten- und/oder Sicherheitsgründen nicht ausgeführt werden können. Zu nennen sind hier beispielsweise die Erkundung von fremden Planetenoberflächen oder die Montage/Reparatur von Tiefseekabeln.

## 2 Grundlagen

Im Folgenden wird zunächst vereinfachend nur eine 2-dimensionale Welt betrachtet. Die Erweiterung auf drei Dimensionen ist im Allgemeinen problemlos möglich.

Um das grundsätzliche Vorgehen bei der Objekterkundung zu beschreiben, wird ersteinmal von einem fingerförmigen Sensor ausgegangen. Es handelt sich hierbei im Prinzip um einen Stab mit halbkugelförmiger Spitze, die den Sensor beinhaltet. Zu sehen ist ein solcher Aufbau beim linken Roboterarm in Abbildung 3. Die Halbkugel habe im Folgenden den Radius  $r_f$ .

### 2.1 Datenauswertung

Ein Ziel aller haptischen Systeme ist es, aus den gesammelten Informationen die Oberfläche des untersuchten Objekts zu bestimmen. Besonders interessant sind hierbei die besonderen Merkmale des Objekts, wie z.B. Kanten und Ecken. Um diese aus den Sensordaten zu extrahieren, gibt es verschiedene Ansätze.

Alle diese Verfahren haben gemeinsam, dass die Sensordaten (und unter Umständen auch Zwischenergebnisse) zunächst geglättet werden, um das Rauschen der Sensoren und die damit verbundenen Meßungenauigkeiten zu verringern. Die vom Sensor aufgenommenen Kontaktpositionen werden zur Bestimmung der Oberfläche also nicht einfach exakt miteinander verbunden. Stattdessen wird eine Linie durch die gemessenen Punkte gelegt, die diese nur näherungsweise verbindet. Außerdem sollte eine Plausibilitätsprüfung vorgenommen werden. Das bedeutet, dass überprüft wird, ob die errechnete Oberfläche überhaupt eine Gestalt hat, die der Sensor erfassen kann. So kann es z.B. sein, dass besonders kleine oder stark gekrümmte Merkmale vom Sensor auf Grund seiner physikalischen Eigenschaften, z.B. seiner Abmessungen, gar nicht erkannt werden können. Sollten diese trotzdem in der berechneten Oberfläche auftreten, müssen sie durch Meßfehler entstanden sein und werden daher aus dem Ergebnis entfernt.

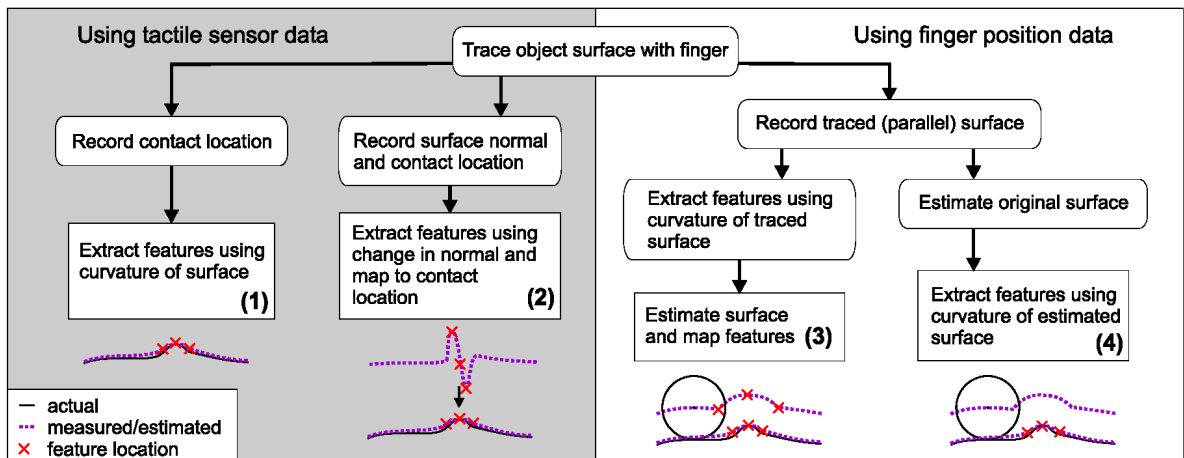


Abbildung 1: Methoden zur Rekonstruktion von Oberflächen, aus [1]

Es gibt im Prinzip zwei Formen von Meßdaten, die zur Rekonstruktion des Objekts verwendet werden können: Entweder die genaue Kontaktposition zwischen Sensor und Objekt oder lediglich die Position des Sensormittelpunkts im Moment des Kontakts zum Objekt. Aus beiden Meßdatentypen ergeben sich jeweils zwei verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Oberflächenverlaufs, die im Folgenden beschrieben werden.

Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens ist natürlich auch vom eingesetzten Sensor und den davon gelieferten Daten abhängig.

### 2.1.1 Verwendung der Kontaktposition

Bei diesem Verfahren muß ein Sensor verwendet werden, mit dem sich möglichst exakt messen läßt, mit welcher Stelle der Sensoroberfläche die Objektfläche berührt wurde. Da Position und Ausrichtung des Sensors bekannt sind, läßt sich somit auch die exakte Kontaktposition (in globalen Koordinaten) bestimmen. Ein großes und weit verbreitetes Problem bei diesem Verfahren ist, dass die Messung der Kontaktstelle am Sensor mit einem relativ starken Rauschen behaftet ist.

Um die gewonnenen Daten auszuwerten, gibt es wiederum zwei Ansätze.

Algorithmus 1 (vgl. Abbildung 1, Teil (1)) bestimmt die Oberfläche direkt aus den (geglätteten) Kontaktpositionen des Sensors. Hieraus werden dann direkt die Merkmale des Objekts bestimmt.

In Algorithmus 2 (vgl. Abbildung 1, Teil (2)) wird nicht nur die Kontaktposition des Sensors, sondern zusätzlich auch die Normale (senkrecht zur Oberfläche stehender Vektor) benutzt. Da die Merkmale des Objekts in den Sensordaten so stärker ausgeprägt sind, lassen sie sich leichter detektieren.

### 2.1.2 Verwendung des Sensormittelpunktes

Bei diesem Verfahren wird nicht die genaue Kontaktposition, sondern die Information über den Mittelpunkt des Sensorkopfes im Moment des Kontakts verwendet und hieraus die Oberfläche bestimmt.

Da sich die Sensormittelpunkte alle auf einer Parallelen zur Objektoberfläche im Abstand  $r_f$  befinden, ist es möglich, auf den Verlauf der realen Oberfläche zu schließen.

Algorithmus 3 (vgl. wiederum Abbildung 1, Teil (3)) bestimmt die Oberflächenmerkmale zunächst aus den Positionen des Sensormittelpunktes und bildet diese dann auf die (vom System) vermutete Oberfläche ab. Dies hat (besonders gegenüber Algorithmus 4, folgender Absatz) den Vorteil, dass sich die Merkmale des Objekts in diesen Daten noch relativ stark niederschlagen und somit leicht bestimmt werden können.

Eine Alternative dazu stellt Algorithmus 4 (vgl. Abbildung 1, Teil (4)) dar. Hier wird zunächst die Oberfläche berechnet und auf dieser dann die Merkmalerkennung vorgenommen. Es handelt sich also im Wesentlichen um eine Vertauschung der Arbeitsschritte aus Algorithmus 3.

Die in [1] gewonnenen Erfahrungen haben gezeigt, dass Algorithmus 3 im Allgemeinen am zuverlässigsten arbeitet und zu den besten Ergebnissen führt.

## 2.2 Auflösung

Das Auflösungsvermögen eines Systems hängt selbstverständlich in erster Linie von den verwendeten Sensoren ab. Benutzt man obigen fingerförmigen Sensor, so ist, wie man sich leicht vorstellen kann, das Auflösungsvermögen im Wesentlichen von der Größe dieses Fingers (also von  $r_f$ ) abhängig. Um hierzu genauere Aussagen treffen zu können zunächst etwas Mathematik:

**Definition 1** *Ein Kreis mit Radius  $r$  besitzt, wenn man ihn im Uhrzeigersinn durchläuft, die Krümmung  $k = +\frac{1}{r}$ . Durchläuft man ihn gegen den Uhrzeigersinn hat er die Krümmung  $k = -\frac{1}{r}$ .*

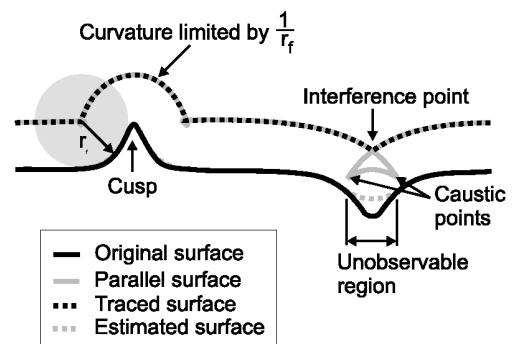


Abbildung 2: Probleme beim Erkennen kleiner Oberflächenstrukturen, aus [1]

Die Krümmung der obigen Fingerspitze beträgt  $\frac{1}{r_f}$  (oder  $-\frac{1}{r_f}$ , je nachdem welche Richtung man betrachtet). Fährt ein solcher Finger nun über eine Oberfläche

gibt es unter Umständen Merkmale die zu klein sind, bzw. deren Krümmung (betragsmäßig) zu groß ist, um korrekt erkannt zu werden. Abbildung 2 veranschaulicht dieses Problem.

Im rechten Bereich befindet sich eine Struktur, die an ihrer tiefsten Stelle eine deutlich größere Krümmung (betragsmäßig) als der Sensor aufweist. Der Schnittpunkt der parallelen Oberflächen (*interference point*) ist hierbei die Stelle, an dem es dem Sensor nicht mehr möglich ist, sich auf einer Parallelen zur Oberfläche zu bewegen. Daraus ergibt sich eine Region des Objekts, die sich von diesem Sensor nicht untersuchen läßt (*unobservable region*).

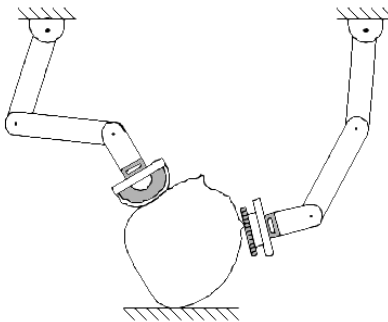


Abbildung 3: Zwei Roboterfinger fixieren ein Objekt, aus [3]

Versucht man nun anhand der Sensordaten den tatsächliche Oberflächenverlauf zu rekonstruieren, steht man vor dem Problem, dass keine Informationen über die *unobservable region* vorliegen. Der erwartete Oberflächenverlauf (*estimated surface*, grau gestrichelt) weicht an dieser Stelle also vom realen (*original surface*, schwarze Linie) ab.

Geht man nicht von einem System mit fingerförmigem Sensor aus ergeben sich auch andere Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit bzw. Auflösung.

Als Beispiel läßt sich hier ein Feld von FSR-Elementen nennen (FSR = force sensing resistor). Dabei handelt es sich um eine größere Anzahl nebeneinander angeordneter Drucksensoren. [2] verwendet ein Feld von  $16 \times 16$  Sensoren auf einer Fläche von  $6,5 \text{ cm}^2$ . Die Größe dieser Sensoren sowie deren Genauigkeit bei der Messung der anliegenden Drücke beeinflusst maßgeblich das Auflösungsvermögen eines solchen Systems. Das Verfahren wird in Kapitel 3.3 genauer beschrieben.

### 3 Verfahren

Die hier vorgestellten Verfahren zur Objekterkundung und Objekterkennung lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen.

Die Verfahren der ersten Kategorie beschäftigen sich damit, wie Objekte als Ganzes oder deren grobe Abmessungen zu bestimmen sind. Als Beispiel wird hier in Kapitel 3.1 ein System beschrieben, welches mit mehreren Roboterarmen arbeitet und einen Gegenstand sozusagen in die Hand nimmt.

Das in Kapitel 3.2 erläuterte Beispiel arbeitet mit Kraft- und Drehmomentsensoren, die beim Abfahren des Objekts den Kontaktpunkt bestimmen.

Die Verfahren, die in die zweite Kategorie fallen, erfassen die feineren Elemente

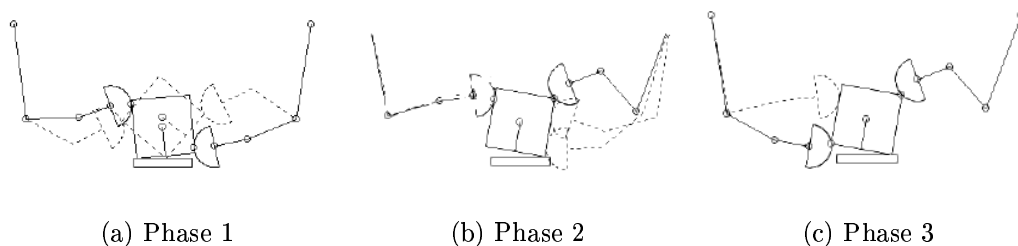


Abbildung 4: Phasen des Verfahrens von Kapitel 3.1 (gestrichelte Linien = vor der Bewegung), aus [3]

der Oberflächenstruktur.

Kapitel 3.3 beschreibt ein weit verbreitetes, aber schon leicht veraltetes System. Es arbeitet mit mehreren, nebeneinander angeordneten Drucksensoren, die auf die zu untersuchende Oberfläche aufgedrückt werden, um deren Strukturen zu erfassen.

Ein genaueres System wird in Kapitel 3.4 behandelt. Es arbeitet zwar auch mit Drucksensoren, die jedoch nicht statisch auf die Oberfläche aufgesetzt werden. Stattdessen gleiten die Sensoren über das Objekt und ermöglichen es so, durch die registrierten Änderungen des Drucks, auch sehr feine Strukturen zu erkennen.

### 3.1 Objekt „festhalten und erkunden“

[3] beschreibt ein Verfahren, bei dem einige Roboterfinger (oder -arme) des Systems das Objekt „greifen“ und in einer Position festhalten, in der sie es mit den verbleibenden freien Fingern erkunden können. Abbildung 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Systems. Einer der Roboterfinger ist dafür zuständig das Objekt derart auf den Untergrund zu drücken, dass es in einer stabilen Position zum Liegen kommt. Dies ermöglicht dem zweiten Finger die Erkundung der ihm zugewandten Seite.

Dies ist auch ein Beispiel für die eingangs angesprochene Nachahmung menschlichen Verhaltens. Der Gegenstand wird „in die Hand genommen“ und mit der freien Hand wird die Oberfläche ertastet.

#### 3.1.1 Algorithmus

Das vorliegende Verfahren benutzt zwei Finger mit jeweils drei Freiheitsgraden, was für die Betrachtung des vereinfachten 2-dimensionalen Falls völlig ausreichend ist. Damit ergibt sich ein Vorgehen, welches sich prinzipiell in drei Phasen gliedern läßt (vgl. Abbildung 4).

**Phase 1** Diese Phase dient dazu, den zu untersuchenden Gegenstand neu auszurichten, so dass die Roboterfinger andere Stellen zur weiteren Untersuchung erreichen können. Das Objekt wird dazu von beiden Fingern erfaßt und im

Uhrzeigersinn gedreht. Dies kann unter Umständen unter Zuhilfenahme des Bodens geschehen. Am Ende dieser Phase muß der linke Finger in der Lage sein, das Objekt selbstständig zu halten.

**Phase 2** Da das Objekt vom linken Finger festgehalten wird, ist der rechte Finger frei und kann zum Ertasten des Objekts eingesetzt werden. Dieser gleitet und/oder rollt also über die ihm zugewandte Seite und bringt sich in eine Position, in der nun er in der Lage ist, das Objekt selbstständig zu halten.

**Phase 3** Diese Phase ähnelt der zweiten Phase. Das Objekt wird vom rechten Finger gehalten und der linke ertastet seine Seite. Am Ende muß der linke Finger in einer Position sein, die einen Übergang in Phase 1 ermöglicht, um den Gegenstand weiter zu drehen.

Grundsätzlich gilt, dass eine Phase abgebrochen wird wenn die Gefahr besteht, dass das Objekt nicht mehr sicher gehalten werden kann. Dann erfolgt ein Übergang in die vorherige Phase, um eine bessere Ausgangssituation zu finden.

### **3.1.2 Einschränkungen/Probleme**

Da sich dieses Verfahren noch in einem experimentellen Stadium befindet gibt es diverse Einschränkungen, die zu berücksichtigen sind.

Versuche haben ergeben, dass das Hauptproblem dieses Systems der begrenzte Arbeitsbereich der Roboterfinger ist. Sollte es einem Roboterfinger nicht möglich sein, sich in eine Position zu bringen in der er das Objekt sicher halten kann, so ist auch der Übergang in die nächste Phase nicht möglich. Um dieses Problem zu minimieren wurden Heuristiken entwickelt, die versuchen die Finger am Ende einer Phase in eine „optimale“ Position zu bringen. Es ist allerdings trotzdem nicht möglich, lange, dünne Objekte zu untersuchen.

Als Lösungsmöglichkeit wird vorgeschlagen, die Beweglichkeit der Finger zu erhöhen (Steigerung des möglichen Drehwinkels jeder Verbindung von  $110^\circ$  auf  $180^\circ$ ). Auch der Einsatz zusätzlicher Roboterfinger könnte helfen, das Problem zu beseitigen.

Ein weiterer Verbesserungsvorschlag ist der Einsatz anderer Sensoren, die es ermöglichen das Objekt besser zu halten. Diese könnten z.B. eine höhere Reibung oder eine größere Auflagefläche haben und so einen sichereren Halt ermöglichen. Außerdem sollen diese beim Ertasten weniger Vibrationen verursachen und auch dadurch zu einem stabilen Halten beitragen.

## **3.2 Kraft-/Drehmoment-Verfahren**

Das in [4] eingesetzte Verfahren benutzt die Daten eines Kraft- und Drehmoment-sensors zur Objekterkennung. Dieser Sensor hängt an einem Roboterarm; an dem

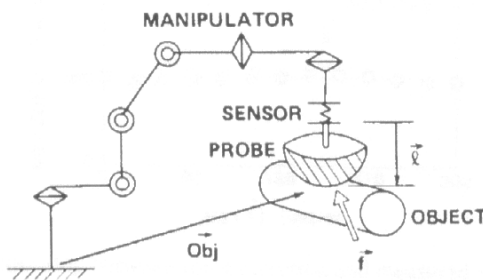
Sensor wiederum ist eine Sonde befestigt, mit der das zu untersuchende Objekt abgefahren wird (vgl. Abbildung 5). Da dieses Verfahren die genaue Bestimmung des Kontaktpunkts zwischen Sonde und Objekt ermöglicht, ist es somit auch möglich, die Objektabmessungen zu bestimmen. Im Vergleich zu anderen Verfahren ist hierfür kein Sensor an der Sonde nötig.

Um nun den Kontaktpunkt zu bestimmen, werden lediglich die im Sensor gemessenen Kräfte und Drehmomente sowie die absolute Position des Sensors benötigt. Der Sensor ist in der Lage Kräfte  $\vec{F}$  und Drehmomente  $\vec{M}$  in allen drei räumlichen Dimensionen zu messen.

Für die folgende Betrachtung geht man davon aus, dass sich der Sensor im Nullpunkt des Koordinatensystems befindet und die angreifende Kraft an der Stelle  $\vec{l}$  wirkt. Damit gilt:

$$\vec{M} = \vec{l} \times \vec{F}$$

Auflösen der Gleichung nach  $\vec{l}$  ergibt als Lösung eine Gerade  $L$  (siehe [4]). Es ist somit noch nicht eindeutig bestimmt, auf welchen Punkt dieser Geraden die Kraft wirkt. Es ist allerdings bekannt, dass sich der Kontaktpunkt irgendwo auf der Oberfläche der Sonde befinden muß.



Um dieses Problem zu lösen, wird ein Modell der Sonde benutzt. Berechnet man nun mit Hilfe des Modells der Sonde den Schnittpunkt der Geraden  $L$  mit der Sondenoberfläche, erhält man den gewünschten Kontaktpunkt.

Wichtig ist, dass dieses System unabhängig von der Form der eingesetzten Sonde funktioniert.

Abbildung 5: Aufbau eines Systems mit Kraft-/Drehmomentsensor, aus [4]

Zusammen mit den Ungenauigkeiten der Sensoren ergibt sich ein Messfehler in den Abmessungen des untersuchten Objekts, der in etwa bei 3% des Sonden-durchmessers liegt. Es ist selbstverständlich zu erwarten, dass dieser Wert nur für „normale“ Sondengrößen gilt und der Meßfehler durch den Einsatz extrem kleiner Sonden nicht beliebig verringert werden kann.

Mit den in [4] eingesetzten Sondengrößen ergeben sich mittlere Fehler von 0,4 - 2,7 mm.

### 3.3 Feld aus Drucksensoren

Ein System mit einem Feld aus Drucksensoren kann zur Untersuchung von Strukturen auf der Objektoberfläche eingesetzt werden. Dazu wird der Sensor auf das



zu untersuchende Objekt gedrückt. Dabei werden an verschiedenen Stellen des Sensors die auftretenden Drücke gemessen. Aus diesen läßt sich ein Abbild des Objekts rekonstruieren. [2] verwendet beispielsweise ein Feld von  $6,5 \text{ cm}^2$  auf dem in einer  $16 \times 16$ -Matrix die Drucksensoren befestigt sind.

Ein solches System eignet sich vor allem zur Detektion von relativ großen Merkmalen auf einem Objekt. Ecken und Kanten können sehr gut erfasst werden, während das Erkennen feinerer Strukturen durch die Größe der einzelnen Sensorelemente und deren Abstand begrenzt ist.

Die einzelnen Sensorelemente bestehen aus piezoelektrischen Elementen zur Druckmessung, an denen eine stäbformige, verformbare Sonde angebracht ist. Diese Sonde dient zur Übertragung der Kraft vom Objekt auf die Sensoren (vgl. Abbildung 6).

Bei der Konstruktion dieser Sonden ist zu berücksichtigen, dass sie sich nicht zu stark zu den Seiten hin verformen dürfen. Dies würde die Weiterleitung der Kraft an die Sensoren verhindern. Außerdem muß möglichst gut bekannt sein, in welcher Art sie sich verformen. Sonst ist aus den Sensordaten kein Rückschluß mehr auf die tatsächlich wirkenden Kräfte möglich.

Eine gute Kraftübertragung in Verbindung mit sensiblen, gut auflösenden Sensoren, ist für ein akzeptables Ergebnis unabdingbar. Die in [2] verwendeten Sensoren ändern ihre Ausgaben bei Drücken im Bereich von  $1 \text{ N/cm}^2$  bis zu  $100 \text{ N/cm}^2$  um zwei Größenordnungen. Damit ist eine sehr genaue Messung möglich.

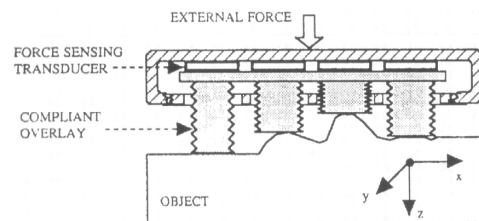


Abbildung 6: Sonden und Drucksensoren in einem Sensorfeld, aus [2]

Soll nun ein Objekt ertastet werden, werden mit dem Sensorfeld sich überlappende „Aufnahmen“ der Oberfläche gemacht. Diese geben die gemessenen Drücke bzw. die Oberflächenstruktur des Gegenstands wieder. Werden diese Aufnahmen miteinander fusioniert, ergibt sich ein Bild des gesamten Objekts.

Zunächst wird nun mit Hilfe einiger Filteroperationen das Rauschen aus den Aufnahmen entfernt. Dann lassen sich mit Methoden der Bilderkennung (Kantendetektion) die interessanten Merkmale des Objekts wie Ecken und Kanten bestimmen. Um auch Merkmale die grösser als das verwendete Sensorfeld sind erkennen zu können, muss man nun mit dem Sensor solchen Merkmalen folgen, um sie genauer zu untersuchen. So ist es beispielsweise möglich, eine komplette Kante zu erkennen, obwohl sie größer als das Sensorfeld ist.

Da ein solcher Sensor im Allgemeinen an einem sich frei orientierbaren Roboterarm befestigt ist, lassen sich allein aus den Daten des Sensorfelds noch keine absoluten Koordinaten der erkannten Merkmale bzw. des Objekts bestimmen. Dafür müssen die Daten aus den Sensoren im Roboterarm, die über dessen Position Auf-

schluß geben, hinzu genommen werden.

### 3.4 Messung der Druckänderung (stress rate sensing)

Noch ein Beispiel für das simulieren menschlichen Verhaltens ist das in [5] beschriebene System. Es wird davon ausgegangen, dass es einfacher ist die Oberflächenbeschaffenheit eines Objekts zu erkennen, wenn man mit den Fingern darübergleitet als wenn man diese einfach nur auflegt.

Um dies zu realisieren wird ein sehr feinfühliges Sensor verwendet, der über das Objekt gleitet und die Druckänderungen registriert. Dadurch ergeben sich mehrere Vorteile im Vergleich zu Systemen, die ihre Messungen nur durch statisches Auflegen der Sensoren vornehmen:

- Da keine absoluten Drücke sondern (im Wesentlichen) Druckänderungen gemessen werden, ist es viel einfacher kleine aber dafür schnelle Veränderungen zu registrieren. Dabei fallen Störungen, wie sie etwa durch Rauschen in den Sensoren hervorgerufen werden, nicht so stark ins Gewicht.
- Benutzt man einen Sensor, der sich nicht über die Oberfläche bewegt, ist ein zweidimensionales Feld von Sensoren nötig. Um ein komplettes Bild einer Oberfläche, die größer als das Sensorfeld ist, zu erhalten wird in den einzelnen Aufnahmen nach Überlappungen gesucht.  
Bewegt sich der Sensor jedoch gleitend über das Objekt ist eine einzige Sensorreihe ausreichend. Vergleichen läßt sich dies mit einem Scanner, der sich über ein Blatt Papier bewegt und daraus ein komplettes Bild zusammensetzt.
- Um den Reibungskoeffizienten einer Struktur zu bestimmen ist eine Bewegung des Sensors zwingend nötig.
- Auch für den Fall, dass es sich um verformbare Strukturen handelt, ist Bewegung hilfreich. Beispielsweise läßt sich ein sandiger Untergrund so einfacher erkennen.

#### 3.4.1 Der Sensor

Der Sensor besteht aus einer Reihe von parallelen Streifen piezoelektrischer Sensoren (vgl. Abbildung 7). Piezoelektrische Materialien haben die Eigenschaft unter mechanischem Druck eine elektrische Ladung aufzubauen. Es wird nun ein Wandler verwendet, an dessen Ausgang sich die Druckänderungen in Form von Spannungsänderungen ablesen lassen. Die Sensorwerte in Form der Spannung  $U$  sind somit proportional zur zeitlichen Änderung des Drucks  $\sigma$ .

$$U \sim \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

Gleitet der Sensor nun über die Objektfläche, wird die Oberflächenstruktur in Form von Druckänderungen registriert.

### 3.4.2 Die Auswertung

Man nimmt zunächst einmal ein Koordinatensystem an, dessen  $z$ -Achse senkrecht zur Objektoberfläche ist und in dem der Roboterfinger in  $x$ -Richtung über das Objekt gleitet. Dieser hat somit die Geschwindigkeit  $v = \frac{\partial x}{\partial t}$  ( $\Leftrightarrow \partial t = \frac{\partial x}{v}$ ).

Da die  $y$ - und  $z$ -Komponenten nicht zu berücksichtigen sind, ergibt sich die zeitliche Änderung des Drucks  $\sigma$  somit zu:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\frac{\partial x}{v}} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} v$$

Das bedeutet, dass die Sensordaten bei konstanter Geschwindigkeit  $v$  proportional zur Druckänderung sind. Außerdem sieht man, dass höhere Geschwindigkeiten zu stärkeren Signalen führen. Die maximale Geschwindigkeit ist allerdings durch zunehmendes Rauschen in den Meßwerten begrenzt.

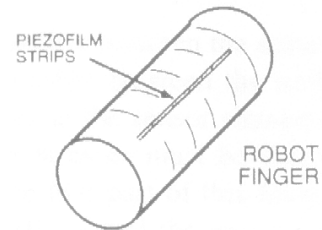


Abbildung 7: Piezoelektrischer Streifen auf einem Roboterfinger, aus [5]

Die Rekonstruktion der realen Oberfläche erfolgt im Prinzip durch Integration der gemessenen Werte. Da die Änderungen des Drucks (bzw. der Oberflächenstruktur) gemessen wurden, ergibt sich dadurch wieder ein Bild des Objekts. Zuvor werden jedoch noch einige in [5] näher beschriebene Filteroperationen durchgeführt, um beispielsweise durch Scherkräfte auftretende Ungenauigkeiten zu berücksichtigen.

Das beschriebene System ist in der Lage, extrem kleine Strukturen zu erkennen. Versuche haben ergeben, dass Merkmale von  $6,5 \mu m$  Größe erkannt werden können. Die Autoren von [5] gehen jedoch davon aus, dass sogar Strukturen, die bis zu einer Größenordnung kleiner sind, erkannt werden können. Zum Vergleich: Die Strukturen in einem Fingerabdruck haben etwa eine Größe von  $15 \mu m$ .

## 4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Seminaarausarbeitung zum Themenkomplex „Mensch-Roboter-Kooperation“ wurden Systeme zur haptischen Objektuntersuchung beschrieben.

Für den praktischen Einsatz wird meistens eine Kombination aus einem System zur Ausrichtung des Objekts bzw. zur Planung der Abtastungswege und ein Sensorsystem zur Erfassung der feineren Oberflächenmerkmale benötigt.

Das in Kapitel 3.1 beschriebene Verfahren zeigt dies gut. Es kann z.B. mit Sensoren wie in den Kapiteln 3.3 und 3.4 vorgestellt kombiniert werden.

Das Verfahren das Objekt „in die Hand zu nehmen“ hat den Vorteil, dass das Objekt nicht befestigt oder fixiert werden muß. Es wird dem Roboter lediglich „in die Hand gelegt“ und dieser kann mit der Erkundung beginnen. Dafür ist selbstverständ-

lich die maximale Objektgröße durch die Anordnung der Roboterarme beschränkt. Außerdem gibt es Probleme bei der Erkennung von gewissen Objektformen, die vom System nicht gegriffen werden können.

Die gegenteilige Situation ergibt sich beim Kraft-/Drehmomentverfahren. Das Objekt sollte dabei so stark fixiert sein, dass es durch die von der Sonde ausgeübten Kräfte nicht verschoben wird. Da an der Sonde selbst kein Sensor mehr befestigt ist und lediglich die Kontaktpunkte aufgenommen werden, ist keine Kombination z.B. mit einem Druckänderungssensor aus Kapitel 3.4 möglich. Feine Details können somit nicht erkannt werden. Dafür gibt es weniger Einschränkungen hinsichtlich der untersuchten Objektformen. Desweiteren sollte es problemloser möglich sein, auch große Objekte durch versetzen des Roboter(-arm)s zu erkennen.

Wie schon zuvor erwähnt, läßt sich das Verfahren der Druckänderungsmessung als Verbesserung des Systems aus Kapitel 3.3 bezeichnen. Es ermöglicht eine Erkennung deutlich feinerer Strukturen und kommt mit einer geringeren Anzahl von Sensoren aus. Außerdem lassen sich auch Faktoren wie der Reibungskoeffizient einer Oberfläche bestimmen, was mit der statischen Messung durch ein Drucksensorfeld nicht möglich ist.

Welches System im Einzelfall am besten geeignet ist, hängt wohl von den jeweiligen Bedingungen und Anforderungen ab. Häufig ist die Bestimmung von derart kleinen Strukturen, wie sie von der Druckänderungsmessung erkannt werden können, gar nicht nötig. Außerdem muß berücksichtigt werden, ob es sich um starr fixierte oder bewegliche Objekte handelt. Für die eingangs erwähnte Erkundung fremder Planetenoberflächen dürfte es unabdingbar sein, dass ein Roboter in der Lage ist, Gegenstände wie z.B. Steine zu bewegen. Bei der erwähnten Kontrolle von Tiefseekabeln wird man dagegen eher von starren Objekten ausgehen können.

## Literatur

- [1] Stanford University, A. M. Okamura und M. R. Cutkosky, „Haptic Exploration of Fine Surface Features“
- [2] Canadian Space Agency (W. S. McMath, S. K. Yeung), University of Ottawa (E. M. Petriu, M. D. Colven), Carleton University Ottawa (D. C. Petriu), „High Sampling Resolution Tactile Sensor for Object Recognition“
- [3] Stanford University, A. M. Okamura, M. L. Turner, M. R. Cutkosky, „Haptic Exploration of Objectc with Rolling and Sliding“
- [4] T. Tsujimura und T. Yabuta, „Object Detection by Tactile Sensing Method Employing Force/Torque Information“
- [5] R. D. Howe und M. R. Cutkosky, „Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing“