

Taktile Mensch–Maschine Interaktion*

Human-Robot Tactile Interaction

Thomas Wösch
Corporate Technology, Information & Communications
Siemens AG
D-81730 München
thomas.woesch@mchp.siemens.de

Zusammenfassung Service-Roboter arbeiten in vielen Fällen im selben Arbeitsraum, wie des Menschen. Der Mensch benötigt Möglichkeiten, mit der Maschine zu interagieren. In diesem Beitrag wird eine Interaktionsmöglichkeit über eine „taktile Haut“ beschrieben. Verschiedene Arten von Taktilinteraktionen zwischen Anwender und Maschine, wie auch zwischen der Umgebung und der Maschine, werden vorgestellt. Alle Interaktionsmöglichkeiten basieren auf demselben Mechanismus: Die an Taktilsensoren ermittelten Kräfte werden in Gelenkmomente des Roboters umgerechnet. Beispielhafte Ergebnisse werden an unserem Experimentalsystem demonstriert. In dem Beispiel wird der Roboter vom Menschen über das taktile Interface geführt.

Abstract Most service robots work in the same environment as humans. Therefore the robot must provide interaction channels to the human. This paper introduces a interaction *via* a tactile interface. Several kinds of tactile interactions between a user and the robot as well as interactions of the robot with the environment are presented. All interactions are implemented in a single paradigm: Forces measured from tactile sensors result into robot joint torques. We present results from our experimental setup. In the illustrated example, a human interacts with the robot using only the tactile interface.

1 Einleitung

In den letzten Jahren war man zunehmend bestrebt, den erfolgreichen Einzug der Roboter in die Industrie, auf den Servicebereich auszudehnen. Als Servicebereich versteht man in vielen Fällen den alltäglichen Lebensraum des Menschen. Die Maschine soll Aufgaben neben dem Menschen lösen, um diesen zu unterstützen oder Arbeiten bis zu einem gewissen Grad abzunehmen. Darin besteht auch die Herausforderung, nämlich Roboter in den Alltagsbereich einzuführen.

Durch den Einsatzbereich im Alltag bedingt, sind die Umgebungen der Roboter dynamisch und größtenteils nur teilweise bekannt. Die Aufgaben können unterschiedlich sein, der Roboter muß in der Lage sein, Szenarios von durchschnittlicher Komplexität zu handhaben. Wenn ein Service-Roboter sich den Arbeitsraum mit dem Menschen teilt, spielt der Sicherheitsaspekt eine entscheidende Rolle.

*Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden teilweise mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 01IN601A2 und 01IL902DO gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

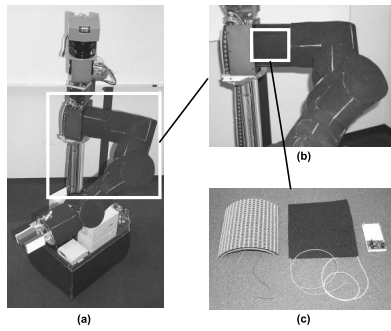


Abbildung 1: (a) Experimentalsystem, (b) Armbereich mit taktiler Sensorik, (c) Detailansicht eines taktilen Sensor

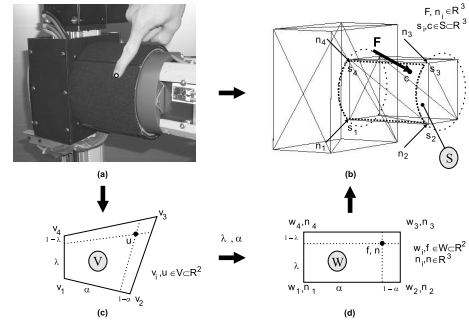


Abbildung 2: Kontaktpunkt- und Kräfteermittlung

Die Bewegungen des Roboters sollten ähnlich wie die eines Menschen sein. Auch die Ausführung von entgegengenommenen Aufträgen soll dem Menschen nachvollziehbar bleiben. Niemand wird einer Maschine vertrauen, die in einer für einen Beobachter nicht vorhersehbaren Art und Weise agiert. Um einen möglichst „natürlichen“ Umgang mit der Maschine zu ermöglichen, müssen dem Menschen bzw. dem Anwender Interaktionsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden, die über derzeit eingesetzte, wie beispielsweise Spracherkennung und -ausgabe oder Gestikerkennung, hinausgehen.

Dieser Beitrag stellt eine direkte Interaktionsmöglichkeit mit der Maschine vor. Über taktile Sensoren, die in Abschnitt 3 näher beschrieben werden, kann ein physikalischen Kontakt an der Maschine detektiert werden. Die sich ergebenden Interaktionsmöglichkeiten sind in Abschnitt 4 zusammengefaßt. Die Umrechnung der Sensordaten eines Kontakts zu einer am Robotersystem ansetzenden physikalischen Kraft wird in Abschnitt 5 beschrieben. Abhängig vom aktiven „Interaktionsmodus“ wird für jeden Kontaktpunkt ein Bewegungsvektor ermittelt, der die Bewegung dieses Punktes beschreibt und aus der schließlich eine Bewegung des Roboters resultiert, siehe Abschnitt 6. Experimentelle Ergebnisse, sowie eine Beschreibung des Gesamtsystems, sind in Abschnitt 7 zusammengefaßt. Abschnitt 8 faßt die Ergebnisse dieses Beitrags zusammen.

2 Literatur

Besonders im Bereich der Service-Robotik ist die Interaktion zwischen Mensch-Maschine von entscheidendem Interesse. [1] verwendet Sprache und berührungsempfindliche Eingabeflächen zur Interaktion. In [2] werden Systeme vorgestellt, die versuchen, den Roboterzustand dem Anwender gegenüber, durch Mimik oder entsprechende Bewegungen auszudrücken. [3] verwendet taktile Informationen eines Kraft-/Momentensensors, um den Roboter im Endeffektor zu führen. Im Gegensatz zu [4] wo ein optisches Verfahren eingesetzt wird, um die taktilen Informationen zu erhalten, arbeitet der hier eingesetzte Sensor nach einem ohm'schen Prinzip. Der Vorteil des hier verwendeten Sensors liegt in dessen Unempfindlichkeit gegenüber Stößen.

3 Taktile Sensor

In Abbildung 1a erkennt man, daß das gesamte Robotersystem mit taktilen Sensoren¹ ausgestattet ist. Ein Sensorsegment (siehe Abbildung 1c) besteht aus zwei elektrisch leitfähigen Kunststoffen. Im Ruhezustand werden beide durch ein isolierendes Netz getrennt voneinander gehalten. Werden die Schaumstoffflächen aufeinandergedreht, dann reicht das Netz nicht mehr aus, beide Schaumstoffflächen voneinander zu trennen und es kommt zu einem Kontakt beider Schaumstoffe. Der Übergangswiderstand zwischen beiden Schaumstoffflächen ist umso geringer, je stärker beide Flächen aufeinander gedreht werden. Der Ort, an dem die Schaumstoffflächen aneinander gedreht werden, und die Stärke des Druckes wird gemessen. Dazu ist jedes taktile Segment mit einem Micro-Controller ausgerüstet. Die taktilen Segmente sind über CAN Bus miteinander verbunden.

4 Taktile Interaktion

Unterschiedliche Arten von taktile Interaktion können mit dem im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten taktilen Sensor durchgeführt werden. Dabei handelt es sich sowohl um Interaktionen Menschen-Maschine als auch um Interaktionen Maschine-Umwelt.

4.1 Geführte Bewegung

Ein Anwender kann an der hier vorgestellten taktilen „Haut“ durch Druck Kräfte ausüben, die in Gelenkmomente umgerechnet werden, aus denen die Bewegung des Roboters resultiert. Der taktile Sensor wird nicht von den Roboterteilen selbst beeinflusst, weshalb im Gegensatz zur klassischen Null-Kraft-Regelung keine Kompensation von Kraft und Moment im Ruhezustand notwendig ist.

Der offensichtlichste Fall einer geführten Bewegung, ist wohl der, in dem der Roboter versucht eine extern wirkende Kraft durch entsprechende Ausweichbewegungen abzubauen. Neben dieser einfachen Interaktionsmöglichkeit, sind aber auch komplexere möglich, abhängig davon in welcher Betriebsart sich der Roboter befindet. Neben dem beschriebenen „Push“ Mode ist beispielsweise auch ein „Pull“ Mode möglich. In diesem versucht der Roboter nicht die gemessene Kraft durch Bewegungen abzubauen, sondern aufrechtzuerhalten. Es ist möglich die Robotersegmente zu führen oder in ein Arbeitsszenario des Roboters interaktiv einzugreifen.

4.2 Taktile Mensch-Maschine Kommunikation auf symbolischer Ebene

Das System stellt unterschiedliche Arten der taktilen Interaktion zur Verfügung. Die einzelnen Interaktionsmöglichkeiten können verschiedene Betriebsarten aufweisen, wie aus dem vorhergehenden Abschnitt der „Geführten Bewegung“ ersichtlich ist. Es sind Mechanismen notwendig, um zwischen diesen Betriebsarten umzuschalten. Dies kann selbst auch wiederum über die taktilen Sensoren erfolgen. Dazu können bestimmte vordefinierte Punkte an den taktilen Sensoren verwendet werden. Abhängig von der Druckdauer und Druckperiode, können dem System unterschiedliche Informationen mitgeteilt werden. Beispielsweise können zwei kurze Stöße mit einer kurzen dazwischenliegenden

¹Siemens-Patent, amtl. Aktz. 19959703.0

Pause ein taktiles Segment, an dem diese Eingabe erfolgte, in den „Push“ Mode versetzen. Wohingegen zwei kurze Stöße mit einer längeren dazwischenliegenden Pause das Segment in den „Pull“ Mode setzen können.

Mit der Einführung eines taktilen „Alphabets“ ist es möglich, mit dem Robotersystem zu kommunizieren. Dabei ist darauf zu achten, daß dieses Alphabet nicht mit gerade aktiven Betriebsarten in Konkurrenz tritt. Außerdem muß es dem Anwender intuitiv erscheinen. Das Aufstellen eines solchen Alphabets ist eine komplexe Aufgabe und erfordert eine Reihe von Experimenten. Eventuell liefert die Nachrichtentheorie hilfreiche Richtlinien.

4.3 Interaktion Mensch-Umgebung

Mit Hilfe des hier vorgestellten taktilen Sensors ist es möglich, Kontakte über den gesamten Roboter zu erkennen. Bewegt sich der Roboter autonom, d.h. ohne Aufsicht, dann kann dieser in den „Obstacle Detection“ Mode geschaltet werden. In dieser Betriebsart interpretiert das System jeden Kontakt als Kollision mit der Umgebung und leitet entsprechende Gegenmaßnahmen ein. Die Dauer einer Kollision ist länger als jene impulsartigen Kontakte, die zur Kommunikation mit der Maschine verwendet werden (siehe Abschnitt 4.2), womit eine Unterscheidung beider Kontaktarten möglich ist. Damit kann auch im „Obstacle Detection“ Mode mit dem System über die taktilen Sensoren interagiert werden.

Das taktile Sensorsystem kann dazu verwendet werden, ein Model der Umgebung aufzubauen. Im „Exploration“ Mode versucht der Roboter (vorsichtig) absichtlich einen Kontakt mit der Umgebung herzustellen, um sein Umgebungsmodell aufzubauen bzw. zu erneuern.

4.4 Auswahl der Betriebsarten

Die Betriebsart, in dem sich das taktile System befindet, hängt im wesentlichen von dem Zustand, in dem sich das System während der Ausführung einer Aufgabe befindet, ab. Wie bereits in Abschnitt 4.2 erwähnt, ist es möglich die Betriebsarten über das taktile Interface selbst als Anwender zu setzen. Selbstverständlich können die Betriebsarten zur taktilen Interaktion auch über herkömmliche Interaktionsmöglichkeiten wie Sprach-, Gestikerkennung oder Tastatur gesetzt werden.

Soll ein Robotersystem autonom agieren, ist es Aufgabe des Systems zwischen den taktilen Betriebsarten umzuschalten. Ähnlich wie die Aktivierung und Deaktivierung verschiedener Sensoren, abhängig von dem Zustand, in dem sich das System bei der Ausführung einer Aufgabe befindet, ist die Auswahl der taktilen Betriebsart, zum Erfüllen einer Aufgabe, Teil der Aufgabenbeschreibung (siehe [5]).

5 Kontaktpunkt und Kraft

Dieser Abschnitt beschreibt, wie eine an einer Sensorfläche wirkende Druckkraft (siehe Abbildung 2a) in eine am entsprechenden Robotergelenk wirkende Kraft resultiert (siehe Abbildung 2b).

Ein Sensor liefert den Ort einer Kontakts als Spannungswertepaar $\underline{u} \in V \subset R^2$, siehe Abbildung 2c. Dabei wird ein rechteckförmiges Sensorsegment auf ein nicht-rechteckförmiges Viereck im

Spannungswertepaarbereich V abgebildet. Mit Hilfe der Konvexkombination

$$\underline{u} = \underline{v}_1 + \lambda \hat{v}_1 + \alpha (\hat{v}_2 + \lambda (\hat{v}_3 - \hat{v}_1)) \quad \text{mit } \lambda, \alpha : [0, 1] \quad (1)$$

wird der Spannungswertepaarbereich entzerrt, sodaß dieser die ursprüngliche rechteckförmige Fläche des Sensors wiedergibt, siehe Abbildung 2d. Mit Hilfe der aus der Konvexkombination (1) erhaltenen Faktoren λ und α kann der Kontaktpunkt in den entzerrten Spannungswertepaarbereich W umgerechnet werden. Dieser Bereich kann nach einer Skalierung und Koordinatentransformation auf eine Fläche am Roboter abgebildet werden. Damit ist dem vom Sensor gelieferten Spannungswertepaar \underline{u} ein am Roboter liegender Aufpunkt bzw. Kontaktpunkt \underline{c} zugeordnet.

Auf ähnliche Weise wird für die im Kontaktpunkt \underline{c} ansetzenden Kraft eine Richtung bestimmt. Dazu ist im Spannungswertepaarbereich W jedem Eckpunkt ein Richtungsvektor $\underline{n}_i \subset R^3$ zugeordnet, siehe Abbildung 2d. Für den Kontaktpunkt wird über die Faktoren λ und α aus (1) ein entsprechender Richtungsvektor interpoliert, der die Richtung der im Kontaktpunkt c wirkenden Kraft beschreibt.

Die Länge des im Kontaktpunkt c wirkenden Kraftvektors ist proportional der vom Sensor bestimmten Druckstärke k_{press} . Abbildung 2b zeigt die resultierende Kraft $\underline{F} = k_{press} \frac{\underline{n}}{\|\underline{n}\|}$, die sich aufgrund eines Kontakts am Sensor ergibt.

6 Generierung einer Bewegung

An einem Robotersegment können mehrere taktile Sensoren angebracht sein. Die einzelnen nach Abschnitt 5 ermittelten Kräfte werden gelenkweise superpositioniert. Unter der Annahme, daß an einem Robotersegment N taktile Sensorflächen angebracht sind und an jedem Sensorsegment n eine Kraft \underline{F}_n ermittelt wird, ergibt sich eine resultierende Kraft $\underline{F} = \sum_{n=1}^N \underline{F}_n$. Weiters läßt sich mit Hilfe der Kontaktpunkte \underline{c}_n ein Moment $\underline{M} = \sum_{n=1}^N \underline{c}_n \times \underline{F}_n$ angeben. Kraft und Moment lassen sich zu dem Bewegungsvektor

$$\underline{\delta} = \begin{pmatrix} \underline{F} \\ \underline{M} \end{pmatrix} \quad (2)$$

zusammenfassen, der eine Bewegung im Arbeitsraum beschreibt. Dieser wird über[6]

$$\underline{\tau} = \left(\frac{J}{\underline{p}} \right)^T \underline{\delta} \quad (3)$$

in den Gelenkraum abgebildet und zur Bewegungssteuerung des Roboters verwendet.

7 Experimentelle Ergebnisse

Das Testsystem besteht aus einem Manipulator-Arm mit 8 Freiheitsgraden, der auf einer nicht-holonomen Plattform montiert ist. Der gesamte Arm und die Seiten der mobilen Plattform sind mit taktilen Sensoren ausgestattet. In Summe befinden sich 45 taktile Sensoren am System.

In Abbildung 3a-c interagiert eine Person mit der Maschine. Die Implementierung der vorgestellten Methode resultiert in „menschennähnliche“ Bewegungen. Die Bewegungen fügen sich „gleichmäßig“ in das Mensch-Maschine Interaktionsszenario ein. Selbstkollisionen werden von einem Kollisionsvermeidungssystem rechtzeitig erkannt und vermieden. Da beide Systeme, das zur Kollisionsvermeidung

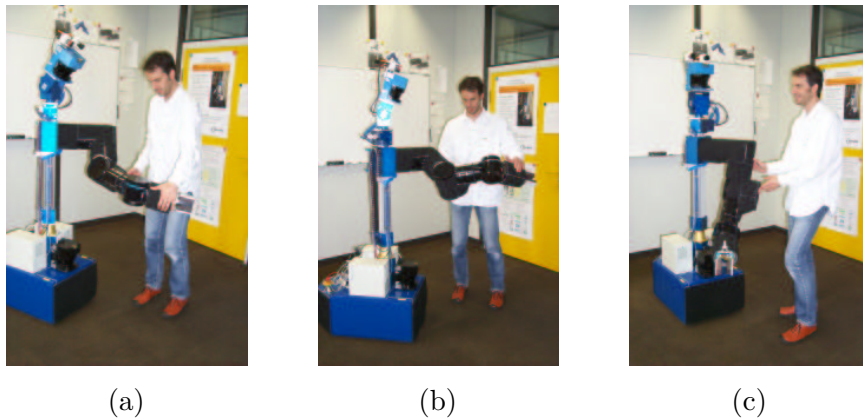


Abbildung 3: Taktile Mensch-Maschine Interaktion.

und das hier vorgestellte, auf demselben Prinzip beruhend, nämlich das Erzeugen von Ausgleichbewegungen basierend auf Kraftinformationen, arbeiten diese nebeneinander.

8 Zusammenfassung, Ausblick

Dieser Beitrag stellt verschiedene Arten der taktilen Interaktion vor. Dabei kann es sich sowohl um eine Interaktion Mensch-Maschine, als auch um eine Interaktion Umgebung-Maschine handeln. Abhängig von der gewählten Art der Interaktion ist beispielsweise ein Führen oder Erstellen und Erneuern eines Umgebungsmodells möglich. Die Umschaltung zwischen den taktilen Betriebsarten kann von einem Anwender, über die taktilen Sensoren mit Hilfe eines taktilen Alphabets, oder vom Roboter autonom erfolgen.

Die vorgestellte Methode soll mit einer planenden Komponente ergänzt werden, um lokale Minima zu vermeiden. Die Kombination der hier vorgestellten taktilen Interaktionsmöglichkeit mit herkömmlichen, wie z.B. Sprach- oder Gestikerkennung, zu einem gemeinsamen multi-modalen Interaktionssystem wird untersucht werden.

Literatur

- [1] Sebastian Thrun, Maren Bennewitz, Wolfram Burgard, Armin B. Cremers, Frank Dellaert, Dieter Fox, Dirk Hahnel, Charles R. Rosenberg, Nicholas Roy, Jamieson Schulte, and Dirk Schulz, "MINERVA: A Tour-Guide Robot that Learns," in *KI - Künstliche Intelligenz*, 1999, pp. 14–26.
- [2] Cynthia Breazeal, "A Motivational System for Regulating Human-Robot Interaction," in *AAAI/IAAI*, 1998, pp. 54–61.
- [3] R. Voyles and P. Khosla, "Tactile gestures for human/robot interaction," in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Pittsburgh, USA, August 1995, vol. 3, pp. 7–13.
- [4] D.Um, B.Stankovic, K. Giles, T. Hammond, and V. Lumelsky, "A Modularized Sensitive Skin for Motion Planning in Uncertain Environments," in *International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, May 1998, vol. 1, pp. 7–12.
- [5] G. v. Wichert, Th. Wösch, St. Gutmann, and G. Lawitzky, "Mobman – Ein mobiler Manipulator für Alltagsumgebungen," in *Autonome Mobile Systeme (AMS'00)*, R. Dillmann, H. Wörn, and M. v. Ehr, Eds. 2000, Informatik aktuell, pp. 55–62, Springer Verlag, Heidelberg.
- [6] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, Wiley, New York, NY, 1989.