



Doctoral Thesis

Robot compliant motion based on human skill

Author(s):

Koeppe, Ralf Heinrich

Publication Date:

2001

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004317155> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 14133

Robot Compliant Motion based on Human Skill

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Ralf Heinrich Koeppel
Master of Science, Portland State University, U.S.A.
Dipl.-Ing., Universität Stuttgart, Germany
born May 23rd, 1965
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. G. Schweitzer, examiner
Prof. Dr. G. Hirzinger, co-examiner

2001

Abstract

This thesis addresses the problem of programming compliant motion tasks by transferring human sensorimotor skill to multisensory robots. Representative for the variety of possible applications in industry and service robotics, the assembly of objects is considered.

Former work has intensively focused on the lowest level of compliant motion control, i.e., how to achieve stable, fast, and accurate control of contact forces. Higher control levels require components for the identification of the geometric contact and for the specification of compliant motion strategies. Approaches to implement such components have been explored much less than in the field of mobile robotics, where the corresponding problems of localization and navigation are very well developed.

But how can a robot be programmed to perform fine motion sensorimotor assembly tasks? A paragon offers the human himself with the ability to learn complex, sensorimotor tasks and to execute them in a fast and stable manner using his arm as a manipulation tool. The thesis presents an approach to the synthesis of compliant motion by skill transfer from a human to a robot. The already existing work on skill transfer in robotics is limited to partial aspects, such as the representation and acquisition of sensorimotor skills. So far a complete realization of a skill transfer system for compliant motion tasks has not been developed yet.

By studying the problem it becomes evident that the design of a complete skill transfer system does not only require knowledge of the robot system, but also demands insight in human behavior in form of models which have to be taken into account for the design of the system. Furthermore the approach has to address the difference between the human and the robot arm dynamics. The key to the solution is a human-centered approach. It is based on three known human models: a qualitative model of human information processing (model 1), a linear system model of human manual control (model 2), and a system model of the dynamics of the human arm (model 3).

The three models of the human operator do not only provide the fundament on which the work is developed. They also strongly motivated to view the subject of

skill transfer from different perspectives. These different views are represented by particular sequences of chapters forming four tracks within the thesis.

The design and implementation of the complete skill transfer system represents the main track and defines, at the same time, the chronological order of the chapters presented.

The skill transfer process consists of the acquisition of human compliant motion during the demonstration of a task, the representation of human skill, the design of a robot skill architecture including the selection of sensor signals based on the principle of geometric perception, and a compliant motion controller that realizes the desired force and motion trajectory. A force controller is introduced that can be automatically synthesized from technology and process parameters. The technology parameters are easily identified and provided by the system manufacturers. The process parameters can be specified on a non-expert level.

The skill transfer process is applied to a tight tolerance chamferless three-dimensional peg-in-hole task that is characterized by a nonlinear kinematic contact model, and wedging and jamming effects. A teach device is used to record the human kinesis while the operator employs an alignment and insertion strategy that requires translational and rotational motion involving reaction forces and moments. The dynamics of the acquired kinesthetic data is scaled to take into account the superior human arm dynamics as compared to the maximum realizable compliant motion closed loop dynamics of the robot arm. Two modes for geometric perception are implemented on the robot system. The robot pose sense with respect to the initial pose of the first contact, and the visual sense using a stereo camera mounted on the gripper. The robot system can perform the peg-in-hole skill as trained by the human operator. Due to the redundant implementation of the different sensing modes the robot can perform the assembly even when perception modes are disturbed.

The other views/tracks of the thesis are: The quantitative modeling of sensorimotor-skill based human behavior (model 1), including its experimental verification and the investigation of different perceptual modes in view of sensor substitution effects on a Virtual Reality system (model 2), the analysis and optimal design of the skill acquisition process (model 2), and the comparison of the properties of the human and robot arm. Especially the last perspective indicates clearly the performance limits of standard industrial robot systems for force controlled applications. Based on these findings, a new generation of robots is proposed which targets the realization of properties similar to the ones found in human arm coordination and control (model 3).

The thesis describes a complete approach for the transfer of human sensorimotor compliant motion skills to robots. It develops and proves technologies for the design of future, intelligent systems that are programmed by human demonstration.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Problem der Programmierung und Regelung von multisensoriellen Robotern zur Ausführung von Bewegungen mit Kontaktkräften (engl. compliant motion). Als Anwendungsszenario wird, stellvertretend für die Vielzahl von denkbaren Anwendungen in der Industrie- und Servicerobotik, das Fügen von Objekten betrachtet.

Ein Großteil der bisherigen Arbeiten behandelt das Problem der Kraftregelung, d.h. die Frage, wie die auftretenden Kontaktkräfte stabil, schnell und genau geregelt werden können. Die Kraftregelung stellt zugleich die niedrigste Hierarchieebene einer erforderlichen Steuerungsarchitektur dar. In den übergeordneten Hierarchieebenen müssen Komponenten zur Identifikation des geometrischen Kontaktes und zur Spezifikation einer Bewegungs- und Fügestrategie implementiert werden. Ansätze hierzu wurden, im Gegensatz zu den in der mobilen Robotik entsprechenden Aufgabenstellungen der Lokalisierung und Navigation, weit weniger untersucht.

Wie kann nun ein Roboter programmiert werden, damit er "feinfühlig" sensomotorische Fügevorgänge ausführen kann? Ein Vorbild für einen Lösungsansatz bietet der Mensch mit seiner Fähigkeit komplexe, sensomotorische Vorgänge erlernen und diese mit seinem Arm als Manipulationswerkzeug schnell und stabil ausführen zu können. Aus dieser Motivation heraus verfolgt die Arbeit den Ansatz der Programmierung und Regelung von Fügebewegungen durch die Übertragung (Transfer) der sensomotorischen Fertigkeit (Skills) eines Bedieners auf ein Robotersystem.

Es existieren bereits einige Arbeiten zum Thema Skill Transfer in der Robotik. Diese beschränken sich jedoch auf Teilaspekte, wie zum Beispiel die Modellierung und Aufnahme von sensomotorischen Skills. Eine vollständige Realisierung eines Skill-Transfer-Systems für das Ausführen von Manipulationsaufgaben gibt es bisher nicht. Es zeigt sich, dass die Entwicklung eines kompletten Systems nicht nur ein genaues Wissen über das System Roboter erfordert, sondern auch Kenntnisse über das System Mensch voraussetzt. Ein Lösungsansatz muss dabei vor allem die unterschiedlichen dynamischen Eigenschaften der beiden Systeme berücksichtigen.

Den Schlüssel bietet ein mensch-zentrierter Ansatz. Die Arbeit wird hierzu aus drei bekannten Mensch-Bediener Modellen heraus entwickelt. Diese sind ein qualitati-

ves Modell der menschlichen Informationsverarbeitung (Modell 1), ein Modell des Bedieners im Regelkreis mit der Maschine (Modell 2) und ein systemtheoretisches Modell der Dynamik des menschlichen Armes (Modell 3).

Die Arbeit ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird die Modellierung und Aufnahme sensomotorischer Fertigkeiten des Bedieners behandelt. Im zweiten wird die Übertragung der Sensomotorik auf den Roboter entwickelt. Der erste Schritt bei der Übertragung von sensomotorischen Fertigkeiten ist die Aufnahme der Sensomotorik des Bedieners während der Demonstration einer Aufgabe. Die Aufnahme kann durch Kooperation mit einem Robotersystem, durch "Vormachen" in einer virtuellen Welt oder durch direkte Beobachtung erfolgen. In der Arbeit wird eine einheitliche Betrachtungsweise unter dem Gesichtspunkt der Interaktionsdynamik eingeführt und Implementierungen der drei oben genannten Aufnahmeprinzipien vorgestellt. Die Interaktionsdynamik beeinflusst die Ausführung des Bedieners (Modell 2). Eine Aufgabe kann nur dann auf eine natürliche Art und Weise ausgeführt werden, wenn die Interaktionsdynamik minimal oder vernachlässigbar ist. Zwei Aufnahmesysteme mit dieser Eigenschaft werden zur experimentellen Verifikation der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren verwendet.

Ausgehend von einem qualitativen Modell der menschlichen Informationsverarbeitung (Modell 1) wird ein quantitatives Modell der Sensomotorik des Bedieners entwickelt. Als Modellrepräsentation wird ein Neuro-Fuzzy Netz gewählt, welches jede beliebige nichtlineare Abbildung von Sensor- auf Bedieneraktionssignale approximieren kann. Die unterschiedliche Verarbeitungstotzeit bei der visuellen und haptischen Wahrnehmung beeinflusst die Dynamik des Bedieners im Regelkreis (Modell 2). Durch die Rückkopplung dieser Bedienerdynamik in den Eingangsraum der Abbildung können beide Wahrnehmungsmodalitäten ohne ein explizites Wissen über die Totzeit in dem Modell abgebildet werden. Zur experimentellen Verifikation wird ein Virtual-Reality-System aufgebaut, in dem der Bediener beispielhaft eine Palettierungsaufgabe unter visueller und haptischer Wahrnehmung ausführt. Die Experimente ermöglichen Aussagen über das Bedienerverhalten bei der Substitution der haptischen durch eine rein visuelle Wahrnehmung.

Die Übertragung der sensomotorischen Fertigkeit auf einen Roboter kann nicht mit dem quasi "Black-Box-Modell" der Sensomotorik des Bedieners erfolgen. Vielmehr muss das Modell zur Steuerungsarchitektur des Roboters erweitert werden. Dies erfolgt durch eine explizite Strukturierung mit Komponenten zur Identifikation des Kontaktzustandes, zur Beschreibung der Bewegungs- und Kraftstrategie sowie zur Regelung der Kraft- und Bewegungstrajektorie. Bei dem in dieser Arbeit entwickelten Ansatz des Skill Transfers wird der Fügezustand und die Fügestrategie implizit durch die sensomotorische Abbildung dargestellt. Die Abbildung wird aus den Sensor- und Aktionssignalen des Bedieners durch Approximation (Supervised Learning) gelernt. Dabei müssen die Sensorsignale, d.h. die Eingangssignale der sen-

somatorischen Abbildung, die Geometrie eindeutig repräsentieren. Die Prinzipien der Approximation von sensomotorischen Abbildungen werden ausführlich behandelt. Die Wahrnehmung des Roboters wird unterteilt in eine Perzeption der Geometrie und eine Perzeption der Dynamik. In vielen Anwendungen wurden bisher die Kraft-Momenten-Signale und die kartesische Geschwindigkeit zur Interpretation der Geometrie verwendet. Diese Signale beinhalten aber nur einen geringen Anteil an geometrischer Information und werden zudem noch durch die Dynamik des Roboters gestört. Sie können daher nur für Kontaktgeometrien niedriger Komplexität angewendet werden. In der Arbeit wird der Begriff der geometrischen Perzeption definiert und formalisiert. Um Aufgaben höherer Komplexität ausführen zu können, werden einfache Ersatzmodelle des Lagesinnes und des visuellen Sinnes des Menschen aufgestellt und auf den Roboter abgebildet.

Die Perzeption der Dynamik in Form von Kraft-Momenten-Sensorsignalen dient zur Einstellung der gewünschten Fügekraft und -bewegung mit Hilfe von Kraftreglern. Für den Entwurf der Kraftregler wird ein automatisches Syntheseverfahren entwickelt. Hierzu müssen nur wenige und einfach zu spezifizierende Technologie- und Prozessparameter bekannt sein, die vom Anwender leicht vorgegeben werden können. Eine automatische Synthese, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wird, ist nicht Voraussetzung für die Übertragung der Sensomotorik. Sie ist aber ein Technologiebeitrag, der die Anwendung der Kraftregelung bei allen Robotersystemen in Zukunft erheblich vereinfacht.

Die maximale Ausführungsgeschwindigkeit eines Roboters in einer kartesischen Richtung ist proportional zur Systemnachgiebigkeit in der gleichen Richtung. Herkömmliche Roboter sind zur Erreichung hoher Genauigkeit möglichst steif gebaut. Zur Kraftregelung wird daher eine Nachgiebigkeit über die Kraft-Momenten-Sensorik am Greifer eingeführt. Diese ist begrenzt und konstant, also nicht einstellbar. Die Ausführungsgeschwindigkeit des Roboters ist somit beschränkt. Die aus der Demonstration eines Bedieners aufgenommene Fugebewegung muss daher zur Ausführung auf einem Robotersystem unter Berücksichtigung der begrenzten Dynamik des kraftgeregelten Roboters skaliert werden.

Im Gegensatz dazu kann der Mensch seine Nachgiebigkeit in einem weiten Bereich einstellen. Die technische Realisierung dieser Eigenschaft erfordert eine neue Generation von Robotern mit adaptierbarer Nachgiebigkeit in den Gelenken. Das Mechatronikkonzept und die dazugehörige Regelung eines solchen Robotersystems werden skizziert. Solche Technologien ermöglichen zukünftig die Entwicklung von Robotern mit Eigenschaften, die der Armdynamik des Menschen (Modell 3) entsprechen.

Zur Validierung der Roboter-Skill-Architektur wird das Bolzen-Loch-Problem gewählt. Die Sensomotorik des Bedieners wird direkt über einen Kraft-Momenten-Sensorgriff aufgenommen und bezüglich der Dynamik des geschlossenen Kraftregel-

kreises skaliert. Die Allgemeingültigkeit des Ansatzes wird durch die nichtlineare Charakteristik der Kontaktkinematik gewährleistet. Die Dynamik des Roboters muss für alle sechs kartesischen Freiheitsgrade, also auch für die Rotation, beherrscht werden. Durch die enge Füge toleranz und die hochwertige Güte der Objekt oberfläche werden Reibungseffekte mitberücksichtigt. Der visuelle Sinn wird mit zwei Kameras implementiert, ähnlich der Wahrnehmung mit dem linken und rechten Auge des Bedieners. Der Lagesinn bezüglich der Fügeaufgabe wird über die Messung der Robotergelenkposition realisiert. Jeder dieser Wahrnehmungssinne des Roboters garantiert für sich allein die Ausführung des Fügevorganges. Durch eine redundante Implementierung erhält man ein Robotersystem, das auch bei eventueller Störung von einzelnen Wahrnehmungskanälen den Fügevorgang ausführt.

Die Arbeit beschreibt einen vollständigen Ansatz zur Übertragung von sensomotorischen Fertigkeiten von Menschen auf Roboter am Beispiel von Fügevorgängen. Die vorgestellte Methode des Skill Transfers und die entwickelten Technologien der Kraftregelung sind somit ein Beitrag zur Entwicklung zukünftiger intelligenter Robotersysteme, die durch "Vormachen" die Ausführung von komplexen kraftgeregelten Aufgaben erlernen können.