



Doctoral Thesis

Regelungstechnische und biomechanische Beiträge für den Einsatz haptischer Simulatoren in der medizinischen Ausbildung und Rehabilitation

Author(s):

Frey, Martin

Publication Date:

2004

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004903769> →

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 Nr. 15839

REGELUNGSTECHNISCHE UND BIOMECHANISCHE
BEITRÄGE FÜR DEN EINSATZ HAPTISCHER
SIMULATOREN IN DER MEDIZINISCHEN
AUSBILDUNG UND REHABILITATION

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

MARTIN FREY
Dipl.-Ing. Universität Karlsruhe (TH)

geboren am 24. Januar 1976

aus Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Robert Riener, Referent
Prof. Peter Niederer, Koreferent

2004

Kurzfassung

Regelungstechnische und biomechanische Beiträge für den Einsatz haptischer Simulatoren in der medizinischen Ausbildung und Rehabilitation

Mit dem haptischen Sinn erfasst der Mensch Informationen über auftretende Reaktionskräfte, Positionen und Oberflächenbeschaffenheiten seiner unmittelbaren Umgebung. Eine haptische Simulation erlaubt die mechanische Interaktion mit einer virtuellen, also nicht real existenten Umgebung, beispielsweise die Manipulation eines virtuellen Objektes. Für die Realisierung einer haptischen Simulation erfordert es eines Systems zur technischen Realisierung der Interaktion, das haptische Display, dessen Ansteuerung sowie eine geeignete Beschreibung der mechanischen Eigenschaften des virtuellen Objektes, mit welchem die Interaktion erfolgen soll.

Diese Arbeit behandelt regelungstechnische Methoden haptischer Displays und Methoden der analytischen Formulierung dynamischer mechanischer Eigenschaften virtueller Strukturen und Objekte sowie deren Anwendung in der medizinischen Ausbildung und Rehabilitation. Ferner werden Verfahren zur Erfassung mechanischer Eigenschaften humaner Gelenkstrukturen und deren analytische Modellierung und Integration in haptische Simulationen vorgestellt.

Hierfür werden zunächst etablierte Regelungsstrukturen haptischer Displays sowie der Robotik dargelegt und durch die Angabe einer geeigneten Implementierung dynamischer Beschreibungen massebehafteter virtueller Objekte zu umfassenden haptischen Regelungsstrukturen erweitert. Diese heben Einschränkungen für die haptische Darstellbarkeit spezifischer mechanischer Eigenschaften auf. Die Methoden werden in übertragener Weise auf einen Messaufbau für die biomechanische Forschung sowie auf zwei Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Medizin angewandt: auf haptische Simulatoren in der medizinischen Ausbildung und auf die automatisierte Gangrehabilitation von Patienten mit Gehbehinderung.

Ein Verfahren und der experimentelle Aufbau zur räumlich hochauflösenden in vitro Erfassung multidimensionaler elastischer biomechanischer Eigenschaften humaner oder tierischer Gelenkstrukturen wird vorgestellt. Als Messinstrument dient ein Industrieroboter, der mit entsprechender Positions- und Kraftsensorik ausgestattet ist. Durch die Verwendung neuartiger Steuerhard- und Software wurde eine im Verhältnis zu vergleichbaren Messaufbauten schnelle, aber dennoch präzise Erfassung elastischer mechanischer Gelenkparameter erreicht. Anwendung findet der Messaufbau in drei Pilotprojekten der biomechanischen Forschung in der Endoprothetik, bei Untersuchungen hinsichtlich des Kreuzbandersatzes und in der Wirbelsäulenforschung, sowie bei der Erstellung einer räumlich hochauflösenden Messdatenbasis für die Identifizierung eines dynamischen Modells eines menschlichen Kniegelenkes. Ein Verfahren zur analytischen Approximation der gemessenen elastischen Gelenkeigenschaften und deren Implementierung wird angegeben.

Die praktische medizinische Ausbildung steht oft vor dem Problem, keine ausreichende Zahl an Probanden für das Erlernen und Üben diagnostischer und therapeutischer Massnahmen zur Verfügung zu haben. Zur Verbesserung der praktischen Ausbildung in der Orthopädie wurde der Münchner Kniesimulators entwickelt, eine multimodale Trainingsplattform, an welcher die Ausübung manueller Kniefunktionstests erlernt und trai-

niert werden kann. Dies wird mit einem haptischen Display realisiert, welches aus passiven Phantomkörpern des Unter- und Oberschenkels besteht, die an zwei leistungsstarke, mit entsprechender Kraft- und Positionssensorik ausgestattete Roboter gekoppelt sind. Die Roboter sind nicht mechanisch, sondern nur virtuell über die dynamische, analytische Beschreibung des Kniegelenks miteinander gekoppelt. Die Konzeption, der Aufbau und die Validierung zentraler Komponenten dieser Trainingsstation werden vorgestellt und diskutiert. Weitere Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Geburtshilfe und interaktiver Lehrmedien werden gegeben.

Das manuelle Laufbandtraining zur Rehabilitation von Patienten mit Gehstörungen wurde in den letzten Jahren erfolgreich mit Rehabilitationsrobotern automatisiert, welche die Führung der Beine des Patienten auf dem Laufband übernehmen. Ist ein solcher Roboter mit entsprechender Kraft- und Positionssensorik ausgestattet, so kann dieser auch als haptisches Display fungieren. Um die Funktionalität und Interaktivität der automatisierten Gangrehabilitation zu steigern, wurden durch die Anwendung der regelungstechnischen Methoden haptischer Displays erreicht, dass der Roboter patientenkooperatives Verhalten zeigt. Dieses ermöglicht dem Patienten die eigene Wahl des Gangmusters und der Gehgeschwindigkeit wobei er stets in seinen Bewegungen gezielt kraftunterstützt und geführt werden kann. Dadurch wird erwartet, dass die Motivation des Patienten zur aktiven Teilnahme am Rehabilitationstraining stimuliert und der Rehabilitationserfolg gesteigert werden kann.

Abstract

Haptic Displays in Medical Education and Rehabilitation: Control Strategies and Biomechanical Contributions

The haptic sense is used to acquire information about reaction forces, positions, and textures of the nearby human environment. A haptic simulation enables mechanical interaction with an artificial environment, the so called virtual environment. For example, this can be done with handling and manipulating virtual objects. Two main components are required to implement a haptic simulation. First, the haptic interface generates the interaction forces and displays position information. Second, an analytical description of the properties of the virtual object are necessary to realise a virtual interaction.

This thesis focuses on control aspects for haptic interfaces and analytical modelling aspects of virtual objects. Two fields of application are considered: medical education and rehabilitation. Furthermore, a method to acquire the mechanical properties of human joints in vitro and to approximate the acquired data is presented.

Common control strategies from the literature are presented and analysed for their performance and stability in the control theory section of this thesis. Advanced force-position control strategies for robot manipulators are extended by a general dynamic description of mass affected objects. The result is a hybrid impedance admittance control strategy. Some limitations of the basic control strategies in terms of displayable mass, damping

and stiffness parameters are obsolete with the novel concept presented. The introduced methods are applied to applications in the medical field: to haptic simulators in medical education, to automated gait rehabilitation, and to a measurement setup used for biomechanical research.

The measurement setup presented is capable of acquiring in vitro data of elastic joint properties with high resolution and multiple degrees of freedom. The measurement tool is a sensor equipped industrial robot. Novel control hardware and software is used to reach an outstanding control performance compared to similar measurement setups from other workgroups. The measurement setup is applied to three pilot projects in biomechanical research according to endoprosthesis, replacement of the anterior cruciate ligament, and spine research. In addition, it is used to acquire a database with high spacial resolution for the identification of a dynamical model of the human knee joint. Furthermore, a method that can be used to analytically approximate the measured elastic joint properties is presented.

Medical students must learn how to examine and diagnose patients. The practical education in medicine suffers from the fact that there are not enough volunteering patients to participate in student workshops. The multimodal Munich Knee Joint Simulator has been developed to improve medical education in orthopaedics. Its haptic display enables practice and training of clinical knee joint tests in the same way as with a real patient. The simulator consists of passive life-like plastic prostheses of the upper and lower leg. Each is connected to a powerful sensor-equipped robot. The linkage between the upper and lower leg is realised with the analytical description of knee joint dynamics in virtual space. The concept, the architecture, and the validation of the main components of the Simulator are presented and discussed. Further applications in the field of delivery simulation and novel interactive teaching tools are presented.

Manual treadmill training for disabled persons has been successfully automated in the last 10 years. Rehabilitation robots guide the patient legs along a reference trajectory of a healthy gait pattern. Such a rehabilitation robot can serve as a haptic display if it is equipped with appropriate force and position sensors. Haptic display control strategies have been applied to a rehabilitation robot in order to improve its functionality and interactivity. Now the patient is capable of choosing his own gait pattern and speed while his legs are force supported but still remain guided. It is expected that the motivation of the patient to actively participate in gait training will increase and that the therapeutic outcome of the rehabilitation will improve.