



## Doctoral Thesis

# **r<sup>3</sup> - reconfigurable rope robot as a versatile haptic interface for a cave automatic virtual environment**

**Author(s):**

Zitzewitz, Joachim von

**Publication Date:**

2011

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007209057> →

**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 N<sup>o</sup> 20014

**r<sup>3</sup> – A RECONFIGURABLE ROPE ROBOT AS A VERSATILE HAPTIC INTERFACE  
FOR A CAVE AUTOMATIC VIRTUAL ENVIRONMENT**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Joachim von Zitzewitz

Dipl.-Ing., Graz University of Technology

born 21.10.1980 in Frankfurt a.M., Germany

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Robert Riener  
Prof. Dr. Manfred Hiller  
Dr. Friedrich Pernkopf

2011

# Abstract

The human sensory-motor system processes sensory input from the environment and generates the according motor output. Especially in sports, where the execution of movements should be optimized, the understanding of this human "control loop" is of great interest. But also in completely passive, e.g. sleeping subjects, external stimuli can elicit autonomous, unconscious body reactions. Generalizable research results explaining the mechanisms behind these conscious and unconscious body reactions can hardly be found.

In order to systematically investigate these mechanisms, the so-called M<sup>3</sup>-Lab has been set up. Into this setup, display modalities addressing different senses are integrated. These displays can produce a variety of sensory input, effects of which on a human test subject can be measured and evaluated. The visual and the acoustic modality consist of three screens with beamers and a high-fidelity audio system. The goal of this thesis is to add a versatile haptic modality to this setup. This haptic display should be useable on the one hand for sports simulation and on the other hand as a tool for vestibular feedback in sleep research. This combination of applications results in a catalog of requirements which cannot be fulfilled by available robotic systems. A tendon-based robot proved to be the most adequate robot type to meet these requirements.

In the first part of this work, the requirements on a robotic system for the M<sup>3</sup>-Lab are presented. From these requirements, specifications for a tendon-based robotic concept, the r<sup>3</sup>-system (reconfigurable rope robot) are derived. A modular design was chosen which meets these specifications: A high-strength synthetic rope, tensionmeters which measure the force on every single rope, and deflection units which guide the rope into the workspace are fixed components of the r<sup>3</sup>-system. The rope tension is generated either by passive components such as springs of counterweights or active units. The active units are motorized winches equipped with sensors for analogue and digital position measurement and with an unlockable safety brake.

The r<sup>3</sup>-system has to be reconfigured in order to meet the requirements of different applications. A discrete synthesis method was chosen to calculate new application-specific robot configurations and is explained in the second part of this work. With this method, the single robot parameters, the workspace, and the end-effector load at the single workspace points are discretized. Every possible robot configuration (set of robot parameters) is checked for a valid rope-force distribution for all workspace points and loads. The result of the synthesis method is a robot configuration where all deflection points are fixed and all ropes are connected to the end effector.

For some applications, however, no valid fixed robot configuration can be found, e.g., because collisions between ropes and the user cannot be avoided. Therefore, an algorithm was developed which can calculate the distance between the user and the single ropes online. The robot can then be reconfigured, e.g. by moving the deflection units during operations in order to avoid collisions. The algorithm was successfully evaluated with an exemplary tennis application.

To facilitate the adaptation of the  $r^3$ -system to different tasks, the single subfunctions of the software, such as kinematics or control concepts should be universally applicable. As a global solution for the forward kinematics, a physics-based approach was developed and evaluated. A computed-torque controller for position control and a closed-loop force controller, both realized in task space, will be presented. These control approaches serve as a basis for more advanced, user-cooperative control concepts.

In the fourth and fifth part of this dissertation, two applications are shown which were realized with the  $r^3$ -system. The first application is a rowing simulator. In this simulator, the oar force and the boat velocity are calculated as functions of the user's movement. The calculated oar force is then applied to the outer end of a shortened oar by the ropes of the  $r^3$ -system. The first version of the rowing simulator provided 1D force feedback by two ropes and was evaluated by rowing professionals. The version with 3D force feedback by five ropes was used to evaluate the position and force control strategies. Furthermore, control concepts for the a linear boat actuation in longitudinal direction of the boat were developed and implemented. The professionals were convinced of the usability of the rowing simulator as an advanced training tool. The position controller fulfilled the requirements on accuracy for future studies. The presented force controller improved the transparency of the robot by over 50% compared to a simple open-loop control.

As a second application, a platform for sleep research was developed which can be position-controlled in six degrees of freedom. The workload of this platform should enable to lift a slatted frame with a mattress, the user, and additional measurement equipment. Counterweights are used to compensate a part of the high statical load. The platform fulfills the requirements on workload and workspace.

A further application for tennis training was realized at the end of this thesis. In this application, the  $r^3$ -system executes highly dynamic movements. Considering the three very different applications realized up to now, the  $r^3$ -system fulfills the requirements on a versatile robotic system for the  $M^3$ -Lab.

# Zusammenfassung

Das senso-motorische System des Menschen verarbeitet Sinneseindrücke aus der Umwelt und erzeugt entsprechende motorische Reaktionen. Besonders im Sport, wo Bewegungsabläufe optimiert werden sollen, ist das Verständnis dieser menschlichen "Regelschleife" von grossem Interesse. Aber auch bei einem vollkommen passiven, z.B. schlafenden Menschen können durch externe Stimuli autonome, unbewusste Körperreaktionen hervorgerufen werden. Zu den Mechanismen hinter bewussten und unbewussten Körperreaktionen liegen nur wenige generalisierbare Forschungsergebnisse vor.

Um diese Mechanismen systematisch zu untersuchen, wurde am Labor für Sensomotorische Systeme der ETH Zurich das sogenannte M<sup>3</sup>-Lab aufgebaut. In diesem Versuchsaufbau werden verschiedene Display-Modalitäten integriert. Diese können eine Vielzahl von Sinneseindrücken erzeugen, deren Auswirkungen auf den Menschen dann gemessen werden. Visuelle und akustische Modalitäten waren in Form von drei Leinwände mit Beamern und ein komplexes Audiosystem bereits vorhanden. Ziel diese Arbeit war es, eine vielfältig einsetzbare haptische Modalität zu ergänzen. Dieses haptische Display sollte einerseits für Sportsimulation und andererseits für vestibuläres Feedback in der Schlafforschung genutzt werden können. Aus dieser Kombination an Anwendungen ergeben sich Anforderungen, die von heutigen Robotersystemen nicht erfüllt werden können. Als bestgeeignetster Robotertyp für diese Aufgabenstellung stellte sich ein Seilroboter heraus.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die Anforderungen an ein robotisches System für das M<sup>3</sup>-Lab hergeleitet. Aus den Anforderungen heraus werden die Spezifikationen für ein seilgetriebenes Robotikkonzept, das r<sup>3</sup>-System, hergeleitet. Es wurde einen modularen Systembaukasten ausgelegt, welcher diese Anforderungen erfüllt: ein hochfestes Kunststoffseil, Kraftsensoren zur Seilkraftmessung, sowie Umlenkeinheiten, welche das Seil in den Arbeitsraum führen, sind anwendungsunabhängig verwendete Komponenten des r<sup>3</sup>-Systems. Die Seilspannung kann durch passive Komponenten wie Federn oder Gegengewichte oder aktive Einheiten erfolgen. Als aktive Einheit wird eine motorisierten Seilwinde mit Sensoren für analoge und digitale Positionsmessung und einer deblockierbaren Sicherheitsbremse eingesetzt.

Das r<sup>3</sup>-System muss rekonfiguriert werden, um die Anforderungen an die jeweilige Anwendung erfüllen zu können. Der gewählte, diskrete Synthese-Methode zur Berechnung neuer, anwendungsspezifischer Roboterkonfigurationen wird im zweiten Teil dieser Arbeit besprochen. Hierfür werden die Parameter des Roboters, der Arbeitsraum sowie die Endeffektorlast an den einzelnen Arbeitsraumpunkten diskretisiert. Für jede Konfiguration wird überprüft, ob für alle Punkte des Arbeitsraums gültige Lösungen für die Seilkraftverteilung gefunden werden können. Als Ergebnis erhält man eine Roboterkonfiguration, bei der die Umlenkeinheiten fix montiert und alle Seile direkt mit dem Endeffektor verbunden sind.

Für manche Anwendungen können keine fixe Roboterkonfiguration gefunden werden, z.B. da eine Kollision zwischen dem Benutzer und einem Seil nicht vermieden werden kann. Daher wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher online den Abstand zwischen Benutzer und Seilen berechnen kann. Der Roboter kann dann während des Betriebs, z.B. durch Verschie-

bung der Umlenkpunkte, so umkonfiguriert werden, dass eine Kollision vermieden wird. Der Algorithmus wurde anhand einer Beispielapplikation für Tennis erfolgreich evaluiert.

Damit das  $r^3$ -Systems einfach an andere Applikation angepasst werden kann, sollen die einzelnen Funktionsblöcke der Software wie Kinematik oder Regelungskonzepte möglichst universell anwendbar sein. Zur Lösung der Vorwärtskinematik wurde ein allgemeiner physik-basierter Ansatz entwickelt und evaluiert. Ein Computed-Torque-Regler für Positionsregelung sowie ein Kraftregler, beide als task-space Regler ausgeführt, bilden eine Grundlage für fortgeschrittene, benutzerkooperative Regelungskonzepte.

Im vierten Teil werden zwei Anwendungen gezeigt, welche mit dem  $r^3$ -Systems realisiert wurden. Die erste Anwendung ist ein Rudersimulator. Die Ruderkraft und Bootsgeschwindigkeit werden hier als Funktion der Bewegungen des Benutzers berechnet. Die berechnete Kraft wird über Seile des  $r^3$ -Systems am äusseren Ende eines gekürzten Ruders eingeleitet, welches der Benutzer hält. Die erste Version des Simulators mit 1D-Kraftfeedback über zwei Seile wurde durch Ruderprofis evaluiert. An der Version mit 3D-Kraftfeedback durch fünf Seile konnten Positions- und Kraftregler evaluiert werden. Des weiteren wurden Regelungskonzepte für eine Längsaktuierung des Ruderboots entwickelt. Die Profis waren von der Brauchbarkeit des 1D-Simulators als Trainingsgerät überzeugt. Die Positionsregelung des Ruders erfüllte die Genauigkeitsanforderungen für zukünftige Studien; der vorgestellte Kraftregler verbesserte die Transparenz des Roboters um über 50% verglichen mit einem Open-loop Regelung.

Als zweite Anwendung wurde ein Plattform für Schlafforschung entwickelt, welche in sechs Freiheitsgraden lagegeregelt werden kann. Die Arbeitslast der Plattform erlaubt es, einen Lattenrost mit Matratze, den Benutzer und zusätzliches Messequipment aufzunehmen. Mit Hilfe von Gegengewichten wird ein Teil der hohen statischen Last kompensiert. Die Plattform erfüllt die Anforderungen bezüglich Arbeitsraum und Arbeitslast.

Gegen Ende dieser Arbeit wurde noch eine Anwendung für Tennistraining realisiert, bei welcher das  $r^3$ -System hochdynamische Bewegungen ausführt. In Anbetracht der drei bisher realisierten, sehr unterschiedlichen Anwendungen erfüllt das  $r^3$ -System die geforderte Anforderungen an ein vielseitiges Robotiksystem für das  $M^3$ -Lab.