

DISS. ETH NO. 17476

ARMin – Multimodal Robot for the Movement Therapy of the Upper Extremities

A dissertation submitted to
ETH Zürich

for the degree of

Doctor of Science

presented by

TOBIAS LUKAS NEF

ing. él. dipl. EPFL

born 28.06.1977 in Flawil, SG

citizen of Herisau, AR

2007

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. – Ing. Robert Riener

Prof. Dr. David J. Reinkensmeyer

Abstract

Task-oriented, repetitive and intensive arm training can enhance arm rehabilitation in patients with affected upper extremities due to lesions of the central nervous system. There is evidence that the training duration and intensity are key factors for the therapy progress.

In order to achieve intensive and long training, the motivation of the patient turns out to be a key factor. The multimodal arm therapy discussed in this thesis takes into account the following key aspects to motivate the patient: first, the robotic device stimulates the three most important sensory modalities of the patients, i.e. the haptic, visual and auditory sense, and second, so-called patient-cooperative control strategies allow the patient to interact and to cooperate with the robot. This includes that the robot assists the patient just as much as needed to perform a particular movement task.

This thesis is divided into three parts: kinematics of the human arm and the robot, patient-cooperative control and clinical evaluation.

In the first part, the kinematics of arm rehabilitation exoskeletons is discussed. The development, implementation and evaluation of three different arm exoskeletons are presented (ARMin I-III). This includes three new mechanical solutions to actuate the human arm joints, including shoulder, elbow, lower arm rotation, and wrist. The main focus lies on the shoulder actuation as this is the most challenging part from a mechanical point of view. Therefore, a kinematic model of the human shoulder joint is presented. This model served as a basis for the development of the shoulder actuation kinematics.

ARMin Ia is characterized by a statically underdetermined shoulder actuation. The robot becomes statically determined only in combination with the human arm, and therefore, tensions between the robot and the human can be avoided. ARMin II and ARMin III are statically determined exoskeletons that guide the center of the glenohumeral joint in its vertical translational movement.

The devices can work in three therapy modes: passive mobilization, game therapy, and task-oriented training of activities of daily living. Concerning the first mode, a teach-and-repeat procedure is presented that allows the therapist to select a pathology-depended mobilization pattern for the passive mobilization. During the mobilization itself, the robot, repeats these taught movements in position-controlled mode, thus, the robot does not react to the intension of the patient.

In contrast, patient-cooperative control strategies recognize the patient's movement intension and motor abilities in terms of muscular effort and adapt the robotic assistance to the patient's contribution. These strategies are used for the game therapy and for the task-oriented training of activities of daily living. A general control structure for exoskeletons is presented, which allows the

interaction of the human with virtual environments with force feedback. Then, several applications are presented. This includes a ball game, where the patient controls the movement of a virtual handle that is used to catch a ball that is rolling down on a virtual plane. Realistic sound increases the grade of realism of the scenario. The robot supports the patient when the patient is not able to catch the ball. In case that the patient can catch the ball himself, the robot does not deliver support. In a second game scenario, the patient can pass through a labyrinth by moving his hand in the three dimensional space and interact with the virtual walls of a labyrinth.

A similar control schema is used to control the robot for the training of activities of daily living. Hereby, the control strategy is based on the minimum intervention principle, and, thus, maximizes the patient's contribution to the movement. A general approach for this training has been implemented and applied to several healthy subjects.

The third part of this thesis is dedicated to the clinical evaluation of robot-supported arm therapy. The objective was to investigate whether arm training with the robotic rehabilitation device ARMin improves motor function of the paretic upper extremity in persons with chronic stroke. The study design included three single cases, A-B design and eight weeks follow-up. Three volunteers with chronic hemiparesis resulting from unilateral stroke participated in the study. The intervention consisted of the training of shoulder and elbow movements with the ARMin device for eight weeks, and included mobilization and ball game therapy.

The patient significantly ($P < 0.05$) improved their motor performance (Fugl-Meyer), but not their ability to cope with activities of daily living (Barthel Index). It is hypothesized that this is due to the fact that the training protocol was based on artificial movements that do not reflect real activities of daily living. Therefore it is expected that these results can furthermore be improved by the training of activities of daily living.

Zusammenfassung

Aufgabenorientiertes, repetitives und intensives Armtraining kann die Rehabilitation von Patienten mit teilweise gelähmten oberen Extremitäten infolge von Läsionen des zentralen Nervensystems verbessern und beschleunigen. Offenbar sind Trainingsdauer und Trainingsintensität Schlüsselfaktoren für den Therapiefortschritt.

Damit langes und intensives Armtraining erreicht werden kann, muss der Patient kontinuierlich zum Training motiviert werden. Die multimodale Armtherapie, welche in dieser Dissertationsschrift behandelt wird, beinhaltet die folgenden Schlüsselaspekte um den Patienten zu motivieren. Erstens, der Armtherapieroboter ARMin stimuliert die drei wichtigsten sensorischen Modalitäten des Patienten, d.h. die haptische, die visuelle und die akustische Wahrnehmung. Zweitens, sogenannte Patienten-kooperative Regelungsstrategien ermöglichen die Interaktion und die Zusammenarbeit des Patienten mit dem Roboter. Dies beinhaltet dass der Roboter den Patienten bei der Durchführung einer Bewegung nur soviel wie nötig unterstützt.

Diese Dissertationsschrift besteht aus drei Hauptteilen: Kinematik von Arm Exoskeletons, Patienten-kooperative Regelungsstrategien und klinische Evaluierung.

Im ersten Teil wird die Kinematik von Exoskeletons für die Armrehabilitation behandelt. Die Entwicklung, die Implementierung und die Evaluierung von drei unterschiedlichen Ansätzen werden besprochen (ARMin I-III). Dies beinhaltet drei neuartige mechanische Lösungen für die Aktuierung der Schulter, des Ellenbogens, des Unterarms und des Handgelenkes. Hauptfokus liegt auf der Schulteraktuierung, weil dies von einem mechanischen Gesichtspunkt aus das komplexeste Gelenk ist. Deshalb wurde ein kinematisches Modell des menschlichen Schultergelenkes entwickelt. Dieses Modell diente als Grundlage für die Entwicklung von mechanischen Lösungen für die Schulteraktuierung.

So zeichnet sich ARMin Ia durch eine statisch unterbestimmte Konstruktion aus. Der Roboter wird erst in der Kombination mit dem menschlichen Arm statisch bestimmt. Dadurch können Verspannungen zwischen dem Roboter und dem Menschen verhindert werden. ARMin II und ARMin III sind als statisch bestimmte Exoskeletons ausgeführt, welche das Zentrum des Articulatio Humeri in seiner vertikalen Translation nachführen.

Der ARMin- Roboter kann in drei Therapie- Modi arbeiten: passives Mobilisieren, Spieltherapie, und aufgabenorientiertes Training von Aktivitäten des täglichen Lebens.

Damit der Patient das Bewegungsmuster für das Mobilisieren an die Pathologie des Patienten anpassen kann, wurde ein „teach and repeat“ Verfahren implementiert. Dabei zeichnet der Roboter die Positionen auf (teach), bevor die Bewegung vom Roboter selbständig wiederholt wird („repeat“).

Während dem Mobilisieren ist der Roboter positionsgeregelt und reagiert nicht auf die Intension des Patienten.

Demgegenüber erkennen Patienten-kooperative Regelungsstrategien die Bewegungsintension und Bewegungsfähigkeit des Patienten und passen die Roboterunterstützung an die Bedürfnisse des Patienten an. Diese Strategien werden für die Spieltherapie und für das aufgabenorientierte Training von Tätigkeiten des täglichen Lebens verwendet. Eine allgemeingültige Struktur für die Regelung von Exoskeleton Robotern, welche die haptische Interaktion mit Virtuellen Realitäten erlaubt, wird vorgestellt. Diese Struktur wird in mehreren Anwendungen eingesetzt. Dies schliesst ein Ballspiel ein, in welchem der Patient die Position eines virtuellen Schlägers mit seinen Handbewegungen steuern kann und so mit einem virtuellen Ball interagieren kann. Ziel hierbei ist, dass der Patient den auf einer geneigten virtuellen Platte herunter rollenden Ball mit dem Schläger fangen kann. Realistische Töne des rollenden Balles und bei Kollision des Balles mit der Wand und dem Schläger erhöhen den Realismus der Szene. Der Roboter unterstützt den Patienten nur wenn der Patient selber nicht in der Lage ist den Ball zu fangen. In einem zweiten Spielszenario versucht der Patient seine Hand durch ein virtuelles Labyrinth zu führen. Dabei kann er mittels force- feedback mit den Wänden des Labyrinthes interagieren. Eine ähnliche Regelungsstruktur wird für die Regelung des Trainings von alltagsrelevanten Aktivitäten verwendet. Hierbei unterstützt der Roboter den Patienten so wenig wie möglich und so viel wie nötig, um die Eigenaktivität des Patienten und die Intensität des Trainings zu maximieren.

Im dritten Teil dieser Dissertationsschrift wird die klinische Evaluation der roboterunterstützten Armtherapie behandelt. Die Studie untersuchte die Frage, ob das Armtraining mit dem Armtherapieroboter ARMin die Bewegungsfähigkeit der oberen Extremitäten bei chronischen Schlaganfallpatienten verbessern kann. Dazu wurden drei Einzelfallstudien mit A-B Design durchgeführt. Drei Freiwillige mit chronischer Hemiparese nahmen an der Studie teil. Die Intervention bestand aus dem Training von Schulter- und Ellenbogenbewegungen mit dem ARMin Roboter während acht Wochen, und beinhaltete Mobilisieren und Ballspiel Therapie.

Die Patienten zeigten signifikante Verbesserungen ihrer Bewegungsfähigkeit (Fugl-Meyer), aber nicht in ihren Fähigkeiten mit Alltagsaktivitäten fertig zu werden (Barthel-Index). Es wird vermutet, dass dies unter anderem daran liegt, dass künstliche, nicht alltagsrelevante Bewegungen trainiert wurden. Es wird erwartet, dass diese Resultate durch das Training von alltagsrelevanten Bewegungen noch weiter verbessert werden können.
