

DISS. ETH NO.26705

***FUSING CONVENTIONAL
AND ROBOTIC
REHABILITATION THERAPY***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

FABIAN JUST

M.S.E.C.E., Purdue University, USA
M.Sc., Ruhr-University Bochum, Germany
born on 14.06.1990
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Robert Riener
Marcia O'Malley
Georg Rauter

2020

Abstract

Stroke is the most common neurological disease leading to chronic disability. Intensive rehabilitation with a therapist has proven to be the most efficient recovery for stroke patients by increasing motor function and strength. Therefore, 20 years ago, the research field of rehabilitation robotics started to aid conventional therapy to provide intensive rehabilitation to patients. However, currently, rehabilitation robots cannot interpret nor execute the exact therapy vision of the therapist in an intuitive way leading to less intensive therapy.

The goal of this work was to develop and evaluate a therapy fusion concept of conventional and robotic therapy combining the benefits of both. To be able to do this, I needed to increase the current performance of the exoskeleton for patient and therapist through hardware, new software, and improved control strategies. I executed and analyzed clinical studies on the exoskeleton robot “ARMin”, the research version of the commercial ArmeoPower ©, to answer all the following research questions:

The first research question was if the improvement of the existing model-based controller of an exoskeleton robot leads to an increase in its performance. I systematically upgraded our exoskeleton robot with additional hardware and sensors which provided higher accuracy to the model-based controller when testing the performance of the exoskeleton robot at its most extreme length configurations.

The second research question was whether it is possible to design an objective transparency evaluation study that can be used to identify the best transparency controller for the exoskeleton robot ‘ARMin’. I compared the transparency of the model-based controller to a dis-

turbance observer during single and multi-joint movement at different velocities with 20 able-bodied participants. The disturbance observer compensates the undesired dynamics of the exoskeleton robot through sensor input at the physical human-robot interaction points instead of a model-based approach. Through systematic analysis of velocity-dependent effects of controller transparency, I showed that in each scenario the disturbance observer has a significantly better performance. Furthermore, I underlined the choice of the disturbance observer as a sufficient transparency controller for the following interaction studies with significant questionnaire results.

The third research question was if the efficacy of support given by robotic arm weight compensation methods could be objectively assessed in a systematic analysis. Therefore, I tested 31 able-bodied participants in five different poses with respect to the remaining electromyography (EMG) signal of the relevant shoulder and arm muscles. The participants were instructed to try to hold their arm in these poses. A lower EMG activity, therefore, correlates with higher efficacy of the arm weight compensation method. The methods reduced the mean EMG signal by as much as 49%. I objectively assessed in this systematic analysis that one novel method was significantly better than currently used methods. To prove the feasibility of the novel method in stroke patients, I took the analysis one step further by evaluating it at different height levels. I observed possible height-dependent effects of support, suggesting individual height-dependent support during movement in therapy.

The fourth and last research question was if the exoskeleton robot can imitate the therapist's support given to the patient through manual interaction along a predefined path, which I called the BridgeT therapy fusion concept. I carried out a study comparing the movements and EMG activity of able-bodied participants during manual interaction in three conditions: i) with a therapist and without an exoskeleton robot (conventional), ii) in manual interaction with a therapist and with an exoskeleton robot (teach), iii) only with an exoskeleton robot that imitates the therapist interaction (imitate). I found muscle activity differences between the conditions that can be partially explained with the fixation and misalignment of the arm in the exoskeleton, which were not present in the conventional condi-

tion. However, all found muscle activity differences are comparable to the monitored repetition variability and therefore, not relevant. Furthermore, the muscle activation during the robotic therapist imitation is very similar to the activity in the robotic teach condition done manually by the therapist, which underlines that the BridgeT therapy fusion concept works successfully. Finally, the questionnaire results underline the EMG activity similarity felt by the participant and seen by the therapist. With three stroke patients, a shortened able-body protocol was tested with similar success in a feasibility study.

Overall, I developed the first transparent exoskeleton robot that can successfully imitate a therapist's manual interaction with the patient's arm on a predefined movement path. Furthermore, this work contributes to a more objective transparency analysis of robotic devices and a more systematic efficacy analysis of human arm weight compensation.

Zusammenfassung

Schlaganfall ist die verbreitetste neuronale Erkrankung, welche zur chronischen Behinderung führt. Intensive Therapie mit einem Therapeuten hat sich als effektivste Therapiemethode zur Wiedererlangung von Bewegungsfunktion und Kraft etabliert. Um diese intensive Therapie zu gewährleisten erweitere vor 20 Jahren das Gebiet der robotischen Rehabilitation die konventionelle Therapie, um den Patienten intensivere Rehabilitation anzubieten. Leider können aktuelle Rehabilitationsroboter die Therapieideen der Therapeuten nicht intuitiv umsetzen, was zu einer insgesamt weniger intensiven Therapie führt.

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Evaluation eines fusionierten Therapiekonzepts aus konventionellem und robotischem Rehabilitationstraining, welches die Vorteile beider Gebiete vereint. Um dies untersuchen zu können, musste ich die Bewegungsqualität des Exoskeletts für Patient und Therapeuten durch Hardware, neue Software und verbesserte Regelungsstrategien deutlich erhöhen. Ich habe klinische Studien auf dem Exoskelettroboter “ARMin”, der Forschungsversion des ArmeoPower ©, durchgeführt und ausgewertet, um meine folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

Die erste Forschungsfrage war ob die Verbesserung des existierenden modellbasierten Reglers des Exoskeletts zu einer Verbesserung der Bewegungsqualität führt. Ich habe das Exoskelett systematisch mit zusätzlicher Hardware und Sensoren ausgestattet. Dies führte zu einer höheren Genauigkeit des modellbasierten Reglers, welche ich während Bewegungsqualitätstests mit extremen Armlängeneinstellungen des Exoskeletts klar zeigen konnte.

Die zweite Forschungsfrage war, ob es möglich war eine objektive Bewegungsqualitätsanalyse-Studie für das Exoskelett “ARMin” zu entwerfen, welche genutzt werden kann, um den besten Bewegungsqualitätsregler zu finden. In einer Studie mit 20 Probanden habe ich die Bewegungsqualität des modelbasierten Reglers mit einem Störbeobachter während Einzel- und Mehrgelenksbewegungen mit verschiedenen Geschwindigkeiten analysiert. Der Störbeobachter kompensiert die ungewollten Dynamiken des Exoskeletts durch Sensorinformationen an den physischen Mensch-Roboter Interaktionspunkten statt durch einen modelbasierten Ansatz. Durch die systematische Analyse der geschwindigkeitsabhängigen Effekte der Bewegungsqualität konnte ich zeigen, dass der Störbeobachter in jeder Situation bessere und konsistentere Bewegungsqualität erzeugte. Schlussendlich konnte ich die Wahl des Störbeobachters als hinreichendem Bewegungsqualitätsregler für die folgenden Interaktionsstudien durch signifikant bessere Fragebogenresultate der Probanden stützen.

Die dritte Forschungsfrage war ob die Effektivität von Armgewichtsunterstützung durch robotische Armgewichtskompensationsmethoden objektiv in systematischen Analysen überprüft werden kann. Dafür habe ich 31 Probanden in fünf verschiedenen Posen hinreichend ihrer verbleibenden Elektromyografie (EMG) Signale an relevanten Schulter- und Armmuskeln untersucht. Die Probanden wurden instruiert ihren Arm im Exoskelett in der jeweiligen Pose zu halten. Ein geringeres EMG Signal korreliert mit höherer Effektivität der Armgewichtskompensationsmethode. Die Methoden reduzierten die Armgewichtsaktivität auf mindestens 49%. Ich konnte objektiv in einer systematischen Analyse beurteilen, dass eine neuartige Methode signifikant besser war als der aktuelle Goldstandard. Um die Anwendung dieser neuartigen Methode in Patienten zu zeigen, habe ich die Wirkung dieser Methode auf verschiedenen Armhöhen analysiert. Ich habe mögliche höhenabhängige Effekte der Unterstützung gefunden, weshalb ich für Patienten eine individuelle und höhenabhängige Unterstützung während der Therapie vorschlage.

Die vierte Forschungsfrage war ob das Exoskelett die manuelle Unterstützung des Therapeuten auf einer vorgegebenen Bewegung lernen und imitieren kann. Dafür habe ich eine klinische Studie durchgeführt in der ich die Bewegungen und EMG Aktivität der Proban-

den in drei Konditionen vergleichen kann: i) manuelle Interaktion mit Therapeuten ohne Exoskelett (conventional), ii) manuelle Interaktion von Therapeut und Exoskelett (teach), iii) und nur das Exoskelett, welches die Unterstützung des Therapeuten imitiert (imitate). Ich habe Muskelaktivitätsunterschiede zwischen der konventionellen und robotischen Konditionen gefunden, welche zum Großteil durch die Fixation und Falschausrichtung des Armes im Exoskelett erklärt werden kann. Jedoch sind alle gefundenen Muskelaktivitätsunterschiede in der Höhe vergleichbar mit der gemessenen Repetitionsvariabilität und deshalb nicht relevant. Besonders die Muskelaktivität während manueller Interaktion von Therapeuten am Roboter, die “teach” Kondition, ist sehr ähnlich zu der folgenden Imitationskondition “imitate”. Im Weiteren haben positive Fragebogenresultate von Probanden und Therapeuten die Ähnlichkeiten zwischen den Konditionen unterstützt. Mit drei Schlaganfallpatienten wurde ein gekürztes Studienprotokoll mit ähnlichem Erfolg in einer Anwendbarkeitsstudie getestet.

Zusammengefasst habe ich den ersten Exoskelett Roboter mit hoher Bewegungsqualität gebaut, welcher erfolgreich die manuelle Unterstützungskräfte eines Therapeuten auf gegebenen Bewegungen lernen und imitieren kann. Weiterhin trägt diese Arbeit zu einer objektiven Analyse der Bewegungsqualität von Exoskeletten bei und zeigt eine systematische Untersuchung der Effektivität von Armgewichtsunterstützungsmethoden auf.