

DISS. ETH NO. 22940

Development and clinical feasibility of a novel pediatric arm rehabilitation robot

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

URS WALTER KELLER

MSc ETH ME, ETH Zurich

born on 23.02.1983

citizen of

Wildberg, ZH, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Robert Riener

Prof. Dr. Roger Gassert

PD Dr. Hubertus J.A. van Hedel

2015

Abstract

Children with congenital or acquired neurological disorders often have impairments of their arms. This includes children suffering from cerebral palsy, stroke, spinal cord injury or other neurological disorders. The impairment often hampers the child's independence and participation in daily life. An intensive, activity-based and goal-directed upper limb rehabilitation training is essential for improvement and recovery of motor function and can prevent deterioration of arm function in children with moderate to severe impairments. In adult patients with motor or neurological disorders, such as stroke or spinal cord injury, active robotic assistance is increasingly used to achieve an intensive therapy and to actively assist and enhance neurorehabilitation. Furthermore, therapy robots have the potential for accurate assessment of motor function to diagnose the patient status, to measure the therapy progress, or to feed back the movement performance to the patient and therapist in real time. However, there is currently no actuated robot available specifically designed for the rehabilitation of children with upper extremity motor impairments.

In this thesis the development, realization and clinical implementation of ChARMin, the first actuated exoskeleton robot for pediatric arm rehabilitation, is presented. The thesis was performed at the Sensory-Motor Systems Lab, ETH Zurich, Switzerland in collaboration with the Rehabilitation Center for Children and Adolescents, Affoltern a. A., Switzerland and is divided into four main parts.

In the first part of the thesis, the ChARMin robot is presented. The robot was specifically designed to provide an intensive and motivating neurorehabilitative training for children with affected arm motor function, e.g., with cerebral palsy. It combines parallel and serial kinematics to achieve an exoskeleton with six degrees of freedom to assist and assess the shoulder, elbow, and wrist of the pediatric target group. A modular design of the robot enables the application to children aged 5 to 18 years. The parallel structure allows to keep a safe distance between parts of the robot and the patient and it reduces friction. The whole exoskeleton is highly adaptable to cover the anthropometrics for the young patients and is applicable for the left and right arm. A novel passive weight support mechanism allows for a safe operation. Furthermore, a new audiovisual therapy interface was introduced for ChARMin to motivate active participation of the child with playful game-like scenarios.

The second part introduces the control approaches implemented to support the patient's arm with the exoskeleton. Different patient-cooperative control strategies enable free arm movements, assistance as needed and complete guidance of the arm. The controllers are chosen based on the game played and the skill level of the patient. An assist-as-needed path control concept is utilized to support complex multi-axis movements on end-effector basis. For specific single-axis training an adjustable joint-based controller is used. All the controllers include a model to compensate for inertial, gravitational and frictional aspects of the robot and a dithering approach to reduce static

friction. The performance of the controllers and the compensation model were tested and the stability of the different approaches analyzed.

The third part is dedicated to the implemented set of robot-assisted assessments that encompasses kinematic, kinetic, and timing metrics for measurement of arm motor function. Before the assessments were integrated into the ChARMin robot, the applicability, safety, reliability, and comparability to clinical metrics was first investigated in adults. Twenty-four healthy subjects and five patients after spinal cord injury underwent robot-based assessments using the adult exoskeleton robot ARMin. Five different measurements were performed with the visual aid of a display. Ten kinematic, kinetic, and timing assessment parameters were extracted on joint- and end-effector level. The first results with adult subjects suggest that the measurements are widely reliable and comparable to clinical scales for arm motor function. Based on these first results, the five assessment packages were adapted and transferred to the ChARMin platform. Additionally, a new assessment was added in which the patient needs to follow a circularly moving reference on the frontal plane to measure the tracking skills.

In the fourth part the results of the first feasibility case trials are presented. The ChARMin robot, control, and assessments were tested with five pediatric patients suffering from various neurological diagnoses (stroke, cerebral palsy, and traumatic brain injury). In different sessions the patients tried the various training scenarios with different amounts of support and robot settings depending on their therapeutic goals, capabilities, and preferences. The patient characteristics showed a large variety in terms of age (from 6 to 17 years), arm function, trained side, sex, and impairment. The ChARMin robot could be adjusted to all the patients. The five patients were motivated to play various games with different levels of support ranging from free arm movements to complete guidance. Furthermore, three patients successfully performed the robot-assisted assessments two times. These first feasibility trials demonstrated a safe and good applicability of the different training modes to the pediatric target group. The robot was accepted well by the therapists and the patients. The trials revealed only minor shortcomings which need to be addressed before the start of the next extensive ChARMin feasibility study.

In conclusion, the results of this thesis demonstrate a high potential of the ChARMin robot as an advanced exercise tool for arm neurorehabilitation that optimally challenges children in the age of 5- to 18-years. Furthermore, the hardware, control, and assessment methods presented and the results with healthy and affected adults and young patients can serve as a basis for the future development of end-effector and exoskeleton-based robotic platforms.

Zusammenfassung

Kinder mit einer erworbenen oder angeborenen neurologischen Erkrankung haben oft auch beeinträchtigte Armfunktionen. Dies betrifft unter anderem Kinder mit infantilen Zerebralpareesen, Schlaganfall, Rückenmarkverletzungen oder anderen neurologischen Störungen. Diese Beeinträchtigungen erschweren oft die Unabhängigkeit des Kindes wie auch die Teilnahme am täglichen Leben. Ein intensives, zielorientiertes Rehabilitationstraining der oberen Extremität mit aktiver Beteiligung ist wichtig für die Verbesserung und das Wiedererlangen der motorischen Fähigkeiten und kann einer Verschlechterung der Armfunktionen bei mittel- bis schwer betroffenen Kindern entgegenwirken. Für erwachsene Patienten mit motorischen oder neurologischen Störungen, wie zum Beispiel nach einem Schlaganfall oder einer Rückenmarkverletzung, werden immer öfter aktive Roboter verwendet, um eine intensive Therapie zu ermöglichen und das Neurorehabilitationstraining zu unterstützen als auch zu verbessern. Zudem bieten die Therapieroboter die Möglichkeit, die motorischen Funktionen präzise zu messen, um den Zustand des Patienten zu diagnostizieren, den Therapieverlauf festzuhalten oder dem Therapeuten und Patienten in Echtzeit eine Rückmeldung zur Qualität der Bewegung zu geben. Einen aktiven Armroboter, welcher spezifisch für Kinder mit motorischen Beeinträchtigungen entwickelt wurde, gibt es zurzeit jedoch noch nicht.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung, Realisierung und die klinische Umsetzung von ChARMin, dem ersten aktuierten Roboter für die pädiatrische Armrehabilitation, präsentiert. Die Arbeit wurde am Labor für Sensomotorische Systeme der ETH Zürich, Schweiz, in Zusammenarbeit mit dem Rehabilitationszentrum für Kinder und Jugendliche, Affoltern am Albis, Schweiz, durchgeführt und ist in vier Hauptteile gegliedert.

Im ersten Teil der Arbeit wird der ChARMin-Roboter präsentiert. Der Roboter wurde spezifisch entwickelt, um ein intensives und motivierendes Neurorehabilitationstraining für Kinder mit beeinträchtigten Armfunktionen, wie zum Beispiel bei infantiler Zerebralparese, zu gewährleisten. Hierzu wurden parallele und serielle Kinematiken verwendet, um ein Exoskelett mit sechs Freiheitsgraden zu verwirklichen, welches die Schulter, Ellbogen und Handgelenk der pädiatrischen Zielgruppe unterstützen und ausmessen kann. Ein modularer Ansatz ermöglicht die Anwendung für 5- bis 18-jährige Kinder. Die Parallelstruktur garantiert eine sichere Distanz zwischen Roboter und Patient und reduziert die Reibung. Das Exoskelett ist in hohem Maße anpassbar an die Anthropometrie der Kinder und kann für den rechten und linken Arm eingesetzt werden. Ein neuartiger Gewichtsentlastungsmechanismus erlaubt dabei einen sicheren Einsatz. Zudem wurde für ChARMin ein neues audio-visuelles Therapieinterface eingeführt, um mit unterhaltsamen Spielszenarien eine aktive Teilnahme des Kindes anzuregen.

Der zweite Teil stellt die implementierten Regleransätze vor, welche verwendet werden, um den Patientenarm mit dem Exoskelett zu unterstützen. Verschiedene Patienten-

kooperative Regelstrategien ermöglichen dem Arm gerade soviel zu assistieren wie nötig, erlauben aber auch eine freie Armbewegung und eine komplett geführte Bewegung des Armes. Der Regler wird aufgrund des gewünschten Spieles und der Fähigkeiten des Patienten ausgewählt. Ein Pfadregler, welcher nur so stark unterstützt wie nötig, wird verwendet um komplexe Mehrgelenksbewegungen auf Endeffektorbasis zu unterstützen. Für ein spezifischeres Training mit einzelnen Roboterachsen wird ein anpassbarer gelenkbasierter Regler eingesetzt. Alle Regler verwenden ein Modell um Trägheits-, Gravitations- und Reibungsaspekte des Roboters zu kompensieren sowie einen Dithering-Ansatz (von englisch 'to dither' - zittern) um die Haftreibung zu reduzieren. Die Regelgüte und das Kompensationsmodell wurden überprüft und die Stabilität der verschiedenen Ansätze analysiert.

Der dritte Teil befasst sich mit den implementierten robotergestützten Assessments, welche kinematische, kinetische und zeitliche Metriken erfassen, um die Armmotorfunktionen zu beschreiben. Noch vor dem Integrieren der Assessments im ChARMin Roboter wurden die Anwendbarkeit, Sicherheit, Reliabilität und Vergleichbarkeit zu klinischen Metriken bei Erwachsenen untersucht. Mit 24 gesunden Probanden und fünf Patienten nach einer Rückenmarkverletzung wurden die robotergestützten Assessments mit dem ARMin Arm-Exoskelett getestet. Fünf verschiedene Messungen wurden durchgeführt und visuell mit einem Bildschirm unterstützt. Zehn verschiedene kinematische, kinetische und zeitliche Assessmentparameter wurden auf Gelenk- und Endeffektorebene extrahiert. Die ersten Resultate mit erwachsenen Testpersonen weisen darauf hin, dass die Messungen größtenteils reliabel sind und sich mit klinischen Skalen für motorische Funktionen vergleichen lassen. Basierend auf diesen ersten Resultaten wurden die fünf Assessments angepasst und auf den ChARMin Roboter übertragen. Zudem wurde ein weiteres Assessment hinzugefügt in welchem der Patient mit der Hand einem Ziel folgen muss, welches sich in der Frontalebene auf einer Kreisbahn bewegt, um die Nachfolge-Fähigkeiten zu testen.

Im vierten Teil werden die Resultate der ersten Machbarkeitsversuche mit einzelnen Patienten präsentiert. Der ChARMin Roboter, die Regler und Assessments wurden mit fünf Patienten mit unterschiedlichen neurologischen Diagnosen (Schlaganfall, infantile Zerebralparese und Schädel-Hirn-Trauma) getestet. Während dieser Tests probierten die Patienten die Trainingsszenarien mit unterschiedlicher Roboterunterstützung und -einstellung, abhängig von den jeweiligen Therapiezielen, Fähigkeiten und Präferenzen. Die Patienteneigenschaften waren sehr verschieden hinsichtlich des Alters (6- bis 17-Jahren), der Armfunktionen, der trainierten Seite, des Geschlechts und der Beeinträchtigungen. Der ChARMin Roboter konnte an alle Patienten angepasst werden. Die fünf Patienten waren motiviert verschiedene Spiele zu testen. Dabei unterstützte sie der Roboter unterschiedlich stark, von freien Armbewegungen bis hin zu komplett geführten Bewegungen. Des Weiteren haben drei der Patienten zweimal erfolgreich die robotergestützten Assessments durchgeführt. Diese ersten Machbarkeitsversuche bestätigten eine sichere und gute Anwendbarkeit der unterschiedlichen Trainingsmodi bei der pädiatrischen Zielgruppe. Der Roboter fand guten Anklang bei den Therapeuten und Patienten. Die Versuche zeigten lediglich kleinere Mängel auf, welche vor der grösseren ChARMin Machbarkeitsstudie noch behoben werden müssen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Resultate dieser Arbeit ein grosses

Potential für ChARMin aufzeigen, als fortgeschrittenes Übungsgerät für die Armneurorehabilitation, Kinder im Alter von 5- bis 18 Jahren zu unterstützen und optimal herauszufordern. Zudem können die vorgestellte Hardware, die Regler- und Assessmentmethoden sowie die Resultate mit den gesunden und betroffenen Erwachsenen und den jungen Patienten als Grundlage für zukünftige Entwicklungen von Endeffektor- und Exoskelett-Robotern dienen.