Institute of Automation

David Baiden

Interaction Control of a Robotic Rehabilitation Device using Inherent Compliant Actuators with Pneumatic Rotary Elastic Chambers

SHAKER VERLAG

Interaction Control of a Robotic Rehabilitation Device using Inherent Compliant Actuators with Pneumatic Rotary Elastic Chambers

David Baiden

Universität Bremen 2019

Interaction Control of a Robotic Rehabilitation Device using Inherent Compliant Actuators with Pneumatic Rotary Elastic Chambers

From the Faculty of Physics and Electrical Engineering
University of Bremen

for obtaining the academical degree of

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

approved dissertation

by

Dipl.-Ing. David Baiden

Primary reviewer:	Prof. Dr.-Ing. Axel Gräser
Secondary reviewer:	Prof. Dr.-Ing. Kirsten Tracht
Submitted at:	December 13, 2019
Date of dissertation colloquium:	September 16, 2020

Publication Series of the Institute of Automation
University of Bremen

Series 3-Nr.12

David Baiden

Interaction Control of a Robotic Rehabilitation Device using Inherent Compliant Actuators with Pneumatic Rotary Elastic Chambers

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2020

Publication Series of the INSTITUTE OF AUTOMATION, UNIVERSITY OF BREMEN:

1 Colloquium of Automation
2 Automation
3 Robotics
4 Control Theory
5 Image Processing
6 Virtual and Augmented Reality
7 Brain Computer Interface

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7741-4
ISSN 1861-5457

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Acknowledgments

The present thesis emerged based on my activities as engineer at the Friedrich Wilhelm Bessel Institute (FWBI) and as research associate at the Institute of Automation (IAT) at the University of Bremen. First, I would like to thank Prof. Dr.-Ing. Axel Gräser for accepting my proposal and giving me the possibility to develop own ideas to graduate at the IAT. Special acknowledgments are addressed to my secondary reviewer Prof. Dr.-Ing. Kirsten Tracht for her interest in my work as well as to my examiners Prof. Dr.-Ing. Udo Frese and Prof. Dr.-Ing. Walter Anheier for taking part in the examination board.

Many thanks are directed to my experienced supervisor Dr. Oleg Ivlev for the many stimulating discussions with constructive feedback and for pointing me the direction to find solutions for the challenges of this research work. His innovative ideas about pneumatic actuators and several rehabilitation devices created the possibility to realize this thesis. I am also grateful that he gave me the opportunity of having responsibility in project work and being able to learn from the associated manifold tasks.

Furthermore, I am indebted to my former colleagues of both institutes. I especially thank my longtime colleague Dr.-Ing. André Wilkening, who begun studying with me from the first semester in the foundation course, for the many years of good collaboration as well as for the valuable discussions about control theory and implementation approaches. In particular, I want to appreciate the help of Erwin Wendland, who spend countless hours for technical support with regard to assembly and repair of experimental setups, but first and foremost for giving me also some personal advice. Not less gratitude is addressed to Elke Sorgenicht, who was responsible for the production and assembly of the prototype samples. Likewise, Mark Weishaupt, Heinz Weißig and Lothar Renner assisted a lot with technical support. Then I would like to thank my colleagues Henning Stöppler for helpful discussions and support in programming tasks as well as Xiaodong Zhang for some inspiring conversations about control.

During the time at both institutes I had the possibility to supervise several students for their Diploma, Bachelor and Master theses and to collaborate with them. I want to acknowledge especially the intensive work and contribution of Christian Lilge, Yasar Mahmood and Thomas Helmke. In addition, my thanks go to Jens Rehr, Bernd Eilers, Ruslan Zitser, Sven Bartuszies, Michael Meyer and Eugene Kenah, who were likewise involved in this work.

Last but not least, I would like to express my deepest gratitude to my parents for their endless patience and understanding for my aspiration to complete this thesis. Their support with the small things in life often relieved me to focus on the most important things.

Bremen, November 2019 David Baiden

Abstract

In modern robotics humans and machines are closing rank in industry for manufacturing processes, in private homes for automated service delivery and in health care for the rehabilitative purpose of kinesitherapy. Since both participants share the workspace and possibly get in direct physical contact, new particular requirements emerge for the robotic system with regard to an appropriate interaction control as well as for a correspondingly aligned drive technology. In order to prevent injuries, compliant actuator designs in combination with low accelerated masses are well suitable, in which the compliance can either be realized actively by control or passively by the integration of elastic materials. This however implies the problem of a reduced position or force control performance and especially the need for an interaction controller, which is equally matched to the compliant actuators and the application purpose to establish an appropriate human-robot cooperation.

The present dissertation is dedicated to research and development of different interaction control concepts for an exoskeleton robot with inherent compliant actuation on the basis of fluidic direct drives with *Rotary Elastic Chambers* (REC). Moreover, it is investigated which kind of interaction or effect can be achieved, if the complexity of plant models and control structures is kept as low as possible.

Initially, the requisitions for controlling such systems are formulated and the characteristics of fundamental control concepts and actuator types are considered. The first part of the thesis is concerned about modeling of the pneumatic rotary actuators by using experimental as well as phenomenological approaches. In this regard, the actuator model is divided into pneumatic and mechanic subsystems and existing models are modified or extended and enhanced. To fulfill the particular demands and improve the controller accuracy, static torque characteristics are combined with different friction compensation models and a solution is implemented to independently adjust the output torque and joint rigidity.

The second part of this dissertation focuses on the development of interaction controllers that manage without force/torque sensors, which allows to save costs to a large extent. For this purpose, a planar 3 degrees of freedom (DoF) exoskeleton robot equipped with REC actuators is available, which can partly support the lower extremities of a person. As application example an activity of daily living from the area of rehabilitation is chosen, in which elderly people or slightly physically restricted stroke patients should perform repetitive sit-to-stand exercises.

The overall development goal is to provide a suitable combination of compliant actuator and supportive interaction controller to facilitate and successfully complete the sit-to-stand process in a way, that the user is not passively guided along a fixed predefined trajectory, but is mostly self-determined with own authority and only influenced by the robot as little as possible. The presented concepts in this context begin from a simple almost model-free master-slave approach with individual trajectory generation, to the usage of active virtual joint admittances with temporal reference trajectory, through the realization of variable passive joint rigidity. An adaptive iterative learning concept in the Cartesian space eventually allows temporal and spatial freedom of movement. The functionality of the pursued approaches is evaluated by means of practical experiments with healthy and partially physically impaired subjects. In conclusion, the achieved outcomes are described and possible application purposes are named.

Kurzfassung

In der modernen Robotik rücken Menschen und Maschinen sowohl in der Industrie bei Fertigungsprozessen, im privaten Heim zur automatisierten Erbringung von Dienstleistungen als auch im Gesundheitswesen zwecks bewegungstherapeutischer Rehabilitation immer näher zusammen. Da sich beide Beteiligten den Arbeitsbereich teilen und gegebenenfalls in direktem physischen Kontakt befinden, entstehen neue spezielle Ansprüche an das Robotersystem hinsichtlich einer geeigneten Interaktionsregelung sowie der Bedarf einer damit harmonisierenden Antriebstechnologie. Um Verletzungen vorzubeugen, eignen sich nachgiebige Antriebskonzepte in Verbindung mit geringen beschleunigten Massen, bei denen die Nachgiebigkeit entweder aktiv durch einen Regler oder passiv durch die Integration von elastischen Werkstoffen erzeugt werden kann. Damit einher geht allerdings die Problematik einer verringerten Positions- bzw. Kraftregelungsgüte und insbesondere der Bedarf einer gleichermaßen auf die nachgiebigen Antriebe und den Anwendungszweck abgestimmten Interaktionsregelung zur Kooperation mit dem Menschen.

Die vorliegende Dissertationsschrift widmet sich der Erforschung und Entwicklung von unterschiedlichen Interaktionsregelungskonzepten für einen Exoskelett-Roboter mit inhärent nachgiebigen Aktoren auf Basis von fluidischen Direktantrieben mit elastischen Rotationskammern (engl.: *Rotary Elastic Chambers* – REC). Zudem wird untersucht, welche Art der Interaktion bzw. Wirkung erreicht werden kann, wenn die Komplexität von Streckenmodellen und Reglerstrukturen möglichst gering gehalten wird.

Zunächst werden die Anforderungen an die Regelung solcher Systeme formuliert und die Eigenschaften von grundlegenden Reglerkonzepten sowie Antriebstypen betrachtet. Der erste Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Modellierung der pneumatischen Rotationsantriebe unter Verwendung von experimentellen und phänomenologischen Ansätzen. Dabei wird das Antriebsmodell in Subsysteme für Pneumatik und Mechanik unterteilt und bestehende Modelle modifiziert bzw. erweitert. Um den besonderen Erfordernissen gerecht zu werden und die Regelgenauigkeit zu verbessern, werden statische Drehmomentcharakteristiken mit verschiedenen Reibungskompensationsmodellen kombiniert und eine Lösung zur unabhängigen Einstellung von Drehmoment und Antriebssteifigkeit realisiert.

Der zweite Teil dieser Dissertation behandelt die Entwicklung von Interaktionsreglern, die ohne die Verwendung von Kraft-/Momentensensoren auskommen, wodurch sich Kosten in hohem Umfang einsparen lassen. Zu diesem Zweck steht ein dreigelenkiges planares Exoskelett mit REC-Antrieben zur Verfügung, welches die unteren Extremitäten teilweise unterstützen kann. Als Anwendungsbeispiel wird aus dem Bereich Rehabilitation eine Aktivität des täglichen Lebens gewählt, bei der ältere Personen oder körperlich leicht eingeschränkte Schlaganfallpatienten durch repetitive Übungen den Transfer vom Sitz in den Stand durchführen sollen.

Das Gesamtentwicklungsziel besteht darin, mit einer Kombination aus nachgiebigem Aktor und Interaktionsregler den Aufstehprozess so zu unterstützen und erfolgreich abzuschließen, dass der Benutzer nicht passiv auf einer fest vorgegebenen Trajektorie geführt wird, sondern größtenteils selbst die Kontrolle behält und vom Roboter so wenig wie möglich beeinflusst wird. Die diesbezüglich vorgestellten Konzepte reichen von einem einfachen nahezu modell-freien Master-Slave Ansatz mit individueller Trajektoriengenerierung, über die Verwendung von aktiven virtuellen Gelenkadmittanzen mit zeitlicher Solltrajektorie bis hin zur Realisierung variabler passiver Gelenksteifigkeiten. Ein adaptives iterativ lernendes Konzept im kartesischen Raum erlaubt schließlich zeitliche und örtliche Bewegungsfreiheit. Die Funktionalität der verfolgten Ansätze wird anhand praktischer Experimente mit gesunden und teils körperlich beeinträchtigen Testpersonen evaluiert. Abschließend werden die erreichten Resultate beschrieben und mögliche Anwendungszwecke angeführt.

“There are no shortcuts to any place worth going.”
Beverly Sills

Contents