

Modellgestützte automatisierte Reglerauslegung für elektromechanische Antriebssysteme

Von der Fakultät
Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Benjamin Henke
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Johann Reger
Tag der mündlichen Prüfung: 27. April 2016

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2016

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 26

Benjamin Henke

**Modellgestützte automatisierte Reglerauslegung
für elektromechanische Antriebssysteme**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4504-8

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart (ISYS) und als Doktorand bei der Festo AG & Co. KG. Die entstandene Arbeit ist geprägt von der engen Zusammenarbeit und dem positiven Zusammentreffen wissenschaftlicher und praxisnaher Aspekte. Dafür und für die enge Einbindung auf beiden Seiten möchte ich allen Beteiligten herzlich danken.

Herrn Oliver Sawodny möchte ich ganz besonders für die Betreuung, Unterstützung und Förderung während der letzten vier Jahre danken. Herrn Johann Reger danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts.

Möglich wurde diese Arbeit auch erst durch die außergewöhnlich enge und partnerschaftliche Zusammenarbeit mit der Forschung bei Festo. Hier möchte ich insbesondere Rüdiger Neumann, Alexander Hildebrandt und Armin Hartmann für die Betreuung, die Unterstützung und die inspirierenden Diskussionen danken, sowie ihnen und allen anderen Kolleginnen und Kollegen für ihre Hilfsbereitschaft und ihr Interesse an meiner Arbeit.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am ISYS, allen voran Valentin Falkenhahn, Alexander Keck, Michael Böhm, Kai-Uwe Amann und Michael Zeitz, die mich immer unterstützt und diese vier Jahre bereichert haben. Auch den Studenten, die mich über die Jahre begleitet haben, danke ich für die vielen spannenden Ideen und Erfahrungen, die ich dadurch gewonnen habe. Eine Promotion ist immer auch mit Überraschungen und unerwarteten Wendungen verbunden. Sicherheit gegeben hat mir dabei immer das angenehme und verlässliche Arbeitsumfeld am ISYS, zu dem neben Herrn Sawodny auch Gerlind Preisenhammer, Corina Hommel, Joachim Endler und viele weitere jeden Tag beitragen. Dafür vielen Dank! Insgesamt war meine Zeit am ISYS eine großartige Zeit, die ich sehr positiv in Erinnerung behalten werde. Danke an alle, die dazu beigetragen haben!

Abschließend möchte ich auch herzlich meiner Familie und meinen Freunden danken, die mich immer unterstützt und an mich geglaubt haben.

Vielen Dank!

Benjamin Henke, Mai 2016

Kurzfassung

In der Automatisierungs- und Handhabungstechnik werden elektromechanische Antriebe in großer Zahl für Positionieraufgaben eingesetzt. Diese bestehen aus einem elektrischen Motor und einer mechanischen Übersetzung der Bewegung, wobei hier insbesondere Linearachsen mit Spindel- oder Zahnriemenantrieb betrachtet werden. In der industriellen Praxis werden elektromechanische Antriebe meist mit einer Positionsregelung betrieben, die in diesem Kontext auch als Lageregelung bezeichnet wird. Die Auslegung der Lageregelung muss dabei auf die Komponenten des Antriebs abgestimmt werden, was vom Anwender Zeit und Erfahrung verlangt. Abhilfe kann hier eine automatisierte Reglerauslegung schaffen, die einen automatischen Auslegungsalgorithmus zur Bestimmung der Reglerparameter nutzt.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der modellgestützten, automatisierten Reglerauslegung für elektromechanische Antriebssysteme. Das Ziel ist dabei die Entwicklung einer rein modellgestützten, optimierungsbasierten und vollständig automatisierten Auslegung einer Lageregelung in der industriell überwiegend eingesetzten PI-Kaskadenstruktur. Dazu werden zunächst durchgängige Komponentenmodelle für verschiedene Motoren sowie für Linearachsen mit Spindel und Zahnriemenantrieb zusammengestellt und experimentell validiert. Diese werden dann zu einem Modell des Gesamtsystems inklusive Strom- und Lageregelung erweitert. Basierend auf diesen Modellen werden Auslegungskriterien zur Beschreibung des gewünschten Regelkreisverhaltens vorgestellt, diskutiert und ausgewählt. Das Ziel der Auslegung ist dabei ein gutes Störverhalten des geschlossenen Lageregelkreises bezüglich Eingangsstörungen. Die optimalen Reglerparameter im Sinne der Auslegungskriterien werden anschließend über eine gradientenbasierte numerische Optimierung bestimmt. Durch die durchgängige Verwendung modellgestützter Methoden ist so eine automatisierte Reglerauslegung möglich, die vollständig ohne Messungen bei der Inbetriebnahme auskommt.

Die entwickelte Methodik zur Reglerauslegung und deren Übertragbarkeit auf unterschiedliche Antriebssysteme werden an verschiedenen Beispielsystemen experimentell validiert.

Abstract

In automation and handling, a huge number of motion systems are in use for various positioning applications. They typically consist of an electric motor and some sort of mechanical transmission, with the focus of this work being on linear ball screw drives and tooth belt drives. In most industrial applications, these motion systems are operated in a closed loop position control, the so-called motion control. As the parameters of this motion control need to be adjusted for different components or drive configurations, the controller tuning is a time consuming process and usually requires control engineering expertise and experience. Replacing the manual tuning by an automated algorithm for controller tuning can therefore simplify and accelerate the system setup process.

This dissertation investigates a model-based approach to automatic controller tuning for electro-mechanical motion systems. It develops a thoroughly model-based automated controller tuning algorithm for cascade-structured motion control systems, as they are widely used in industrial applications. In a first step, models for different motors as well as linear ball screw drives and tooth belt drives are developed and validated in experiments. Using these component models, a model of the overall mechatronic system is derived, including the current control and motion control system. Based on these models, performance criteria defining the desired behavior of the closed loop system are introduced, analyzed and selected. The selected criteria aim at a good closed loop performance with respect to input disturbances. A gradient-based numerical optimization is applied to find the optimal controller parameters with respect to the previously defined performance criteria. In conclusion, the model-based approach allows for an automated controller tuning that can be applied without any online measurements during the system setup process.

The developed method and its general validity for different motion systems are validated in experiments on several different test setups.