

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 30

Johannes Henikl

**Regelungsstrategien für den Ausleger
einer Autobetonpumpe**

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.: Wien, TU, 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 978-3-8440-4541-3

ISSN 1866-2242

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität Wien. Das Forschungsprojekt wurde im Rahmen einer Industriekooperation von der TTCControl GmbH und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unter den Projektnummern 2426433 und 835446 gesponsert.

Wenn man sich für die Regelungstechnik entscheidet, weiß man nie, wo es einen am Ende hin verschlägt. Von den kleinsten Strukturen wie etwa mikromechanische Sensoren bis zu den großen, energiehungrigen Anlagen der Stahlindustrie ist alles möglich, und eben auch die großen, teils filigran konstruierten Ausleger von Autobetonpumpen. Nur wenige Entscheidungen in meinem Leben waren so bedeutsam wie jene, mich diesem Forschungsprojekt zu widmen. Der wesentlichste Wegbereiter hierfür war Univ.-Prof. Dr.techn. Andreas Kugi, wofür ihm mein besonderer Dank gebührt. Seine Herangehensweise und sein Engagement in der Lehre haben bei mir schon in den ersten Vorlesungsstunden große Begeisterung und Faszination für das Fachgebiet der Regelungstechnik geweckt. Seine Fachkenntnis und sein großer Erfahrungsschatz waren für die Durchführung meiner Arbeit von großem Wert. Insbesondere seine Ermutigungen, auf so manche scheinbar unlösbaren Aufgabenstellungen doch noch einmal einen Blick zu werfen, waren für einige der Resultate in dieser Arbeit entscheidend. Weiterhin ergeht mein Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Oliver Sawodny für die Bereitschaft, das Zweitgutachten zu erstellen, und an Herrn Univ.-Prof. Dr. Gottfried Strasser für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Die Durchführung der Arbeit war zu großen Teilen mit der praktischen Umsetzung der entwickelten Konzepte verbunden. In diesem Zusammenhang ist der SCHWING GmbH für die Bereitstellung und Ausrüstung der Prototypmaschine, der HYDAC International GmbH für die Unterstützung hinsichtlich der hydraulischen Systeme und der TTCControl GmbH für deren Beitrag im Bereich der Steuerungstechnik sowie der Projektkoordination zu danken. Dabei sei den Herren Reiner Vierkotten, Wolfgang Tebeek, Björn Gläser, Dipl.-Ing. Joseph Schnittker

und Dipl.-Ing. Andreas Lehmann von der SCHWING GmbH, den Herren Stephan Grün B.Eng. und Dipl.-Ing. Marcus Pfeiffer von der HYDAC International GmbH sowie den Herren Dr.techn. Ensio Hokka, Mag. Felix Otti und Dipl.-Ing. Roberto Ferrari von der TTControl GmbH besonderer Dank geschuldet.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für die gute Zusammenarbeit und die schöne gemeinsame Zeit bedanken. Insbesondere bin ich Herrn Assistant Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kemmetmüller und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Meurer zu Dank verpflichtet. Beide waren mir stets eine große Hilfe bei der Lösung meiner Aufgabenstellungen.

Abschließend verdienen meine Familie und meine Freunde große Dankbarkeit. Sie haben mich jederzeit unterstützt und bildeten den so wichtigen Gegenpol zur Arbeit. Besonders möchte ich hierbei meiner geliebten Frau Kerstin danken, welche mir für das Schreiben dieser Arbeit immer den Rücken freihielt und viel Geduld aufbringen musste.

Wien, im Mai 2016

Johannes Henikl

Abstract

In the last decades, improved construction techniques and production methods have led to a permanent reduction of the weight of booms of modern mobile concrete pumps. The lower static load enables the use of trucks with a smaller number of wheel axles, a reduction of the support surface needed for steadiness as well as an increase of the operating range. However, the lightweight construction also decreases the overall stiffness and thus results in a higher vulnerability to elastic vibrations. These vibrations, which are primarily stimulated by the manual control of the joints by the operator and the concrete-pumping process, make the operating of these systems more difficult and lead to an accelerated fatigue of the material. This work deals with control strategies for the avoidance and compensation of elastic vibrations. The focus is on the active damping of occurring vibrations and the reduction of the movement of the tool center point. With this, the operation of the system can be significantly simplified. In this work, a passivity-based decentralized approach based on the infinite-dimensional description of the booms in form of Euler-Bernoulli beams is considered for the active damping task. This allows for a modular application independent of the number of boom segments and without the need for an accurate knowledge of the system parameters. Since the hydraulic system typically used for the actuation of the boom exhibits some fundamental deficits in view of high-performance control tasks, an alternative hydraulic architecture is proposed that fulfills the dynamic requirements as well as the demands for functional safety and availability. Based on the active damping control, an additional strategy for the control of the height of the tool center point is presented that compensates the movement of the end hose during the pumping process. For this purpose, an estimation strategy using inertial sensors for the determination of the position of the tool center point with respect to the ground is presented.

An industrial mobile concrete pump with an operating range of about 40 m that is equipped with the newly developed hydraulic system serves as a test carrier for the proposed strategies. For this system, a dynamic simulation model is presented and validated by means of measurements. The effectiveness of the proposed

active damping approach is demonstrated by a number of experimental results. The concept for the control of the height of the tool center point during the pumping process is tested by extensive simulation studies utilizing the validated mathematical model.

Kurzzusammenfassung

Verbesserte Konstruktionstechniken und Produktionsmethoden haben in den letzten Jahrzehnten zu einer ständigen Verringerung der Masse von Auslegern moderner Autobetonpumpen geführt. Die geringere statische Belastung erlaubt die Verwendung von Lastkraftwagen mit einer kleineren Anzahl an Radachsen, eine Verkleinerung der für die Standsicherheit erforderlichen Abstützflächen sowie eine Erhöhung der Reichweiten dieser Systeme. Die Leichtbauweise führt jedoch unvermeidbar zu einer Reduktion der Steifigkeit der Konstruktion, weshalb die Ausleger von Autobetonpumpen im Allgemeinen anfällig für elastische Schwingungen sind. Diese werden im Betrieb durch das Verfahren des Auslegers seitens des Maschinisten sowie durch das Pumpen des Frischbetons verursacht, erschweren dessen Verteilung auf der Baustelle und führen zu einer beschleunigten Ermüdung der mechanischen Struktur. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Regelungsstrategien zur Vermeidung und Kompensation der elastischen Schwingungen. Der Fokus liegt dabei in der aktiven Dämpfung auftretender Schwingungen sowie in der Verringerung der Bewegungen an der Auslegerspitze bzw. dem Endschlauch, wodurch der Betrieb der Maschine wesentlich vereinfacht werden kann. Zur aktiven Schwingungsdämpfung wird in dieser Arbeit ein passivitätsbasierter, dezentraler Ansatz auf Grundlage einer vereinfachten verteilt-parametrischen Beschreibung des elastischen Auslegers verfolgt, welcher modular und unabhängig von der Anzahl an Mastsegmenten einsetzbar ist und keine exakte Kenntnis der Systemparameter erfordert. Da die typischerweise eingesetzten hydraulischen Systeme zur Aktuierung des Auslegers fundamentale Schwächen für die Umsetzung hochperformanter Regelungen aufweisen, wird zudem ein alternatives Hydraulikkonzept vorgestellt, welches den Ansprüchen hinsichtlich der dynamischen Eigenschaften sowie der funktionalen Sicherheit und Verfügbarkeit genügt. Auf Grundlage der aktiven Schwingungsdämpfung wird eine zusätzliche Strategie für die Regelung der Höhe der Auslegerspitze vorgestellt, durch welche gesondert die Bewegung des Endschlauchs während des Pumpvorgangs kompensiert wird. Hierfür wird ein Schätzverfahren unter Verwendung von Inertialsensoren zur Erfassung der Position der Auslegerspitze vorgestellt.

Die Untersuchungen der vorgeschlagenen Regelungskonzepte erfolgen in dieser Arbeit anhand einer typischen Autobetonpumpe mit einer Reichweite von etwa 40 m, die mit dem neu entwickelten Hydraulikkonzept ausgestattet wurde. Für dieses System wird ein dynamisches Simulationsmodell vorgestellt, welches durch Messungen validiert wurde. Die Effektivität des vorgestellten Ansatzes zur Schwingungsdämpfung wird durch eine Vielzahl von experimentellen Ergebnissen gezeigt. Das Konzept zur Regelung der Höhe der Auslegerspitze während des Pumpvorgangs wird durch umfangreiche Simulationsstudien am validierten mathematischen Modell getestet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Literaturübersicht	3
1.3	Ziel und Inhalt der Arbeit	7
2	Modellierung des mechanischen Teilsystems	11
2.1	Kinematik des Systems	14
2.2	Kinetische und potentielle Energie	16
2.3	Nichtkonservative Reibungskräfte	17
2.4	Ritz-Ansatz	18
2.5	Bewegungsgleichungen	22
2.6	Modellvereinfachungen	24
3	Hydrauliksystem	29
3.1	Klassische Lösung der Mobilhydraulik	31
3.2	Alternatives Hydraulikkonzept	33
3.3	Dynamisches Modell des hydraulischen Systems	37
3.4	Steuerung der Verfahrgeschwindigkeit	40
4	Parameteridentifikation und Modellvalidierung	43
4.1	Experimenteller Aufbau	43
4.2	Machine-Vision System	44
4.3	Vorgehensweise Parameteridentifikation	46
4.4	Modellvalidierung	47
5	Aktive Schwingungsämpfung	53
5.1	Verteilt-parametrische Modellierung	54
5.2	Passivitätsbasierter Reglerentwurf	61
5.3	Nachweis der asymptotischen Stabilität des geschlossenen Regelkreises	65

5.4	Dezentrale Realisierung	76
5.5	Experimentelle Ergebnisse	77
6	Messung und Regelung der Höhe der Auslegerspitze	85
6.1	Starrkörperapproximation	89
6.2	Beobachter zur Erfassung der Neigungswinkel mit Inertialsensoren	92
6.3	Komplementärer Filterentwurf	98
6.4	Regelungsstrategie	101
6.5	Simulationsergebnisse	103
7	Zusammenfassung und Ausblick	109
7.1	Zusammenfassung der Arbeit	109
7.2	Ausblick auf zukünftige Arbeiten	111
A	Geometrie der Drehgelenke	113
A.1	Umlenkmechanismus mit 4 Gliedern	113
A.2	Umlenkmechanismus mit 6 Gliedern	114
A.2.1	Fall (I)	116
A.2.2	Fall (II)	119
A.2.3	Fall (III)	120
A.2.4	Polynomiale Approximation	120
B	Asymptotische Stabilität von verteilt-parametrischen Systemen	123
C	Nebenrechnungen für den Stabilitätsnachweis	129
C.1	Positive Definitheit des inneren Produkts	129
C.2	Determinante der Matrix \mathbf{M}	130
C.3	Beschränktheit des inversen Operators	135
	Literaturverzeichnis	155