

Dezentrale nichtlineare Regelung für ein hydrostatisches Getriebe mit unbekanntem Störungen

Dissertation
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von

Hao Sun

geb. am 03.01.1984 in TangShan (China)

Rostock
13. Januar 2016

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann
Lehrstuhl für Mechatronik / Universität Rostock
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Steven Liu
Lehrstuhl für Regelungssysteme / TU Kaiserslautern
Tag der Verteidigung: 27. November 2015

Lehrstuhl für Mechatronik, Universität Rostock
2015

Decentralised Nonlinear Control for a Hydrostatic Drive Train with Unknown Disturbances

Dissertation
to
obtain the academic degree
Doktor-Ingenieur (Dr.Ing.)
at the Faculty of Mechanical Engineering and Ship Technology,
University of Rostock

elaborated by
Hao Sun
born on 01.03.1984 in TangShan, China

Rostock
January 13, 2016

First reporter: Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann
Chair of Mechatronics / University of Rostock
Second reporter: Prof. Dr.-Ing. Steven Liu
Control Systems Group / TU Kaiserslautern
Date of defense: November 27, 2015

Chair of Mechatronics, University of Rostock
2015

Berichte aus dem
Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock

Band 4

Hao Sun

**Decentralised Nonlinear Control for a Hydrostatic
Drive Train with Unknown Disturbances**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Rostock, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4845-2

ISSN 2195-9234

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Acknowledgements

This dissertation presents parts of my results from my academic work as a research assistance at the Chair of Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering and Ship Technology, University of Rostock, during 2011-2015. I would never have been able to finish my dissertation without the guidance of my supervisor, help and support from my dear family, colleagues, and friends.

First of all, I would like to express my deepest sense of gratitude to my supervisor Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann for providing the opportunity to do research under his supervision. His excellent guidance, encouragement and patience are always inspired me during the research of this dissertation. It is really an unforgettable experience to work here with him. I also would like to thank Prof. Dr.-Ing Steven Liu from TU Kaiserslautern to be my second reporter and the effort he put in the review of my dissertation. Many thanks goes to Prof. Dr.-Ing. Hermann Seitz to be the chair of my defence committee as well as Prof. Dr.-Ing. Christoph Woernle and Prof. Dr.-Ing. Jens Werner Falkenstein, who are willing to participate in my defense committee.

Thousand thanks to all my colleagues in the Chair of Mechatronics, especially Dr.-Ing. Andreas Rauh, Dipl.-Ing. Robert Prabel and M.Sc. Saif Siddique Butt. I would also like to thank my dear former colleagues and friends, Dr.-Ing. Jöran Ritzke, Dipl.-Ing. Maik Leska, M.Sc. Barry Dolan, M.Sc. Thomas Meinschmidt and Dipl.-Ing. (FH) Ernst Langnau. Many thanks to their help and best suggestions during the research of my dissertation. It would have been not a fun lab without them and my research would not have been even possible.

My very sincere thanks to Vet. Ing. Uta Matzmohr for her generous care and the home-feeling help, and to our secretaries Mrs. Angela Frankenberg, Mrs Angelika Gehl and Mrs. Kathrin Hollatz for their professional support on all the administrative work.

Finally, I take this opportunity to express the profound gratitude from my deep heart to my beloved parents, my uncle and aunt, and my wife for their love and continuous support.

Rostock, Jan. 2016

Hao Sun

Abstract

A hydrostatic transmission system is a hydraulic circuit which consists of a variable displacement hydraulic pump and a hydraulic motor with either fixed or variable displacement. In comparison to pure mechanical transmissions, hydrostatic transmissions offer a variety of advantages, e.g., a continuously variable transmission ratio with high power density, reversing the direction of rotation without changing the gear and wearless braking manoeuvres, etc. Nowadays, hydrostatic transmissions are widely used as a characteristic component of drive chains for applications in both working machines and off-road vehicles, and they also show a great potential for renewable energy plants, e.g., as transmissions in wind turbines.

In high-performance motion control systems, however, hydrostatic transmissions are less frequently used than electrical and mechanical drives due to their strong nonlinear behaviour, the impact of unknown disturbances, e.g., leakage volume flows as well as disturbance torques, and model uncertainty. Due to the system dynamic properties, the currently industrial standard gain-scheduled PID controllers cannot meet the requirements – accuracy and robustness – in high-performance applications. Thus, these nonlinearities and uncertainties have to be addressed properly using innovative control approaches.

This dissertation focuses on tracking control of hydrostatic transmissions based on a corresponding test bench which involves two main hydraulic components: a variable displacement axial piston pump with swashplate and a variable displacement motor with bent-axis, and the essential sensors: pressure sensors and volume meters. Two electric motors with current converters are employed to replace the diesel engine and the load unit, respectively. To implement advanced control approaches, a dynamic model of the system is required. The nonlinear model proposed in this dissertation is characterised by four differential equations with a lumped leakage volume flow and an unknown disturbance torque as disturbance models. To obtain the optimal (nominal) model parameters, the lumped disturbances are replaced by a corresponding disturbance model, and a parameter identification by means of nonlinear optimization is carried out. According to the nominal system model, a decentralised model-based control approach is proposed where the complete system dynamics is divided into two sub-control loops: the first loop serves for the control of the normalised tilt angle (bent-axis angle) of the hydraulic motor, whereas the second one controls the motor angular velocity. Thus, several model-based control approaches are developed for each sub-control loop, respectively. Moreover, in order to deal with unmeasurable system states and unknown disturbances, the proposed decentralised control scheme is extended by a state and disturbance observer. Therefore, three innovative observer techniques are studied and developed to provide accurate estimations of states and disturbances.

All the control strategies proposed in this dissertation are validated by simulations and experiments. The results indicate that the proposed approaches lead to a precise tracking accuracy for both controlled variables and guarantee a good robustness performance subject to the unknown system disturbances and uncertainties.

Abstract (German)

Eine hydrostatische Getriebeeinheit ist im Wesentlichen ein hydraulischer Kreis, der aus einer hydraulischen Axialkolbenpumpe und einem Hydraulikmotor mit festem oder variablem Hub besteht. Im Vergleich mit mechanischen Getrieben haben hydrostatische Getriebe eine Vielzahl von Vorteilen, z. B. eine kontinuierlich variable Getriebeübersetzung mit hoher Leistungsdichte, Rückwärtsfahren ohne Gangwechsel und verschleißfreie Bremsmanöver usw. Heutzutage werden hydrostatische Getriebe als eine charakteristische Komponente des Antriebsstrangs für Anwendungen im Bereich der Arbeitsmaschinen sowie Geländefahrzeugen eingesetzt. Weiterhin zeigt sich, dass hydrostatische Getriebe für den Einsatz im Bereich der erneuerbaren Energien geeignet sind, z. B. als Getriebe in Windenergieanlagen.

Als Hochleistungsgetriebe werden jedoch hydrostatische Getriebe weniger häufig verwendet als mechanische und elektrische Getriebe. Dieses ist unter anderem durch das stark ausgeprägte nichtlineare Verhalten, die Auswirkungen von unbekanntem Störungen, wie z.B. Leckagevolumenströme und Störmomente, sowie Modellunsicherheiten begründet. Im Hinblick auf die geforderten dynamischen Eigenschaften bezogen auf die Anwendungen können bei den derzeit eingesetzten PID-Reglern die Hochleistungsanforderungen – Genauigkeit und Robustheit – nicht ausreichend erfüllt werden. Daher müssen die vorhandenen Nichtlinearitäten und Unsicherheiten in Form von innovativen Regelungsansätzen angemessen berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Ansätze zur Regelung und Störgrößenreduktion vorgestellt, mit denen sich ein gutes Folgeverhalten für ein hydrostatisches Getriebe erzielen lässt. Die Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Regelungskonzepte wird an einem entsprechenden Prüfstand aufgezeigt. Der Aufbau des Prüfstands besteht im Wesentlichen aus zwei hydraulischen Komponenten: eine verstellbare Schwenkscheiben-Axialkolbenpumpe und einen verstellbaren Schrägachsen-Hydraulikmotor, die durch Hydraulikschläuche miteinander verbunden sind. Des Weiteren sind Drucksensoren und Volumenstromzähler am Prüfstand verbaut. Zwei Elektromotoren mit Stromrichtern werden verwendet, um den Dieselmotor als Antriebseinheit sowie das wirkende Lastmoment zu ersetzen. Für den modellbasierten Regelungsentwurf werden mathematische Modelle der zu regelnden Systeme benötigt. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene Modell ist durch vier nichtlineare Differenzialgleichungen unter Berücksichtigung des Leckagevolumenstroms und unbekannter Störmomente gekennzeichnet. Um genaue und verlässliche Modellparameter zu erhalten, werden die wirkenden Störungen durch entsprechende Störmodell nachgebildet und anschließend eine Parameteridentifikation auf Basis einer nichtlinearen Optimierung durchgeführt. Auf Grundlage des nominellen Systemmodells wird eine dezentralisierte modellbasierte Regelungsstruktur vorgeschlagen, wobei

die Struktur in zwei Teilregelkreise aufgeteilt wird: die erste Schleife dient zur Regelung des normierten Neigungswinkels (Schrägachswinkel) des Hydraulikmotors, wohingegen die zweite Schleife die Motorwinkelgeschwindigkeit als Regelgröße verwendet. Hierzu werden mehrere modellbasierte Regelungsansätze für die jeweiligen Regelschleifen entwickelt. Darüber hinaus erfolgt eine Erweiterung der vorgeschlagenen dezentralen Regelungsstruktur um einen Zustands- und Störgrößenbeobachter. Dieser schätzt die nicht messbaren Systemzustände und unbekanntes Störungen, die für die Rückführung im modellbasierten Konzept benötigt werden. In dieser Arbeit werden drei innovative Beobachterkonzepte vorgestellt und für die gegebene Problemstellung entworfen, um genaue Schätzungen der Zustände und Störungen zu liefern.

Das hohe Potential der hier vorgestellten Regelungskonzepte wird anhand zahlreicher experimenteller Ergebnisse belegt. Dabei liegt das Augenmerk sowohl auf dem Trajektorienfolgeverhalten als auch auf der stationären Genauigkeit und Robustheit.

Contents

List of figures	IX
List of tables	XI
Nomenclature	XIII
1 Introduction	1
1.1 Hydrostatic transmission (HST)	1
1.2 Motivation and background	4
1.2.1 Control-oriented modelling of hydrostatic transmissions	6
1.2.2 Control of hydrostatic transmissions	7
1.3 Objectives of the dissertation	10
1.4 Outline of the dissertation	11
2 Modelling of the test bench	13
2.1 A hydrostatic transmission test bench	13
2.1.1 Hydraulic components	15
2.1.2 Sensors	20
2.1.3 Software	22
2.2 Control-oriented modelling of the hydrostatic transmission	24
2.2.1 Hydraulic subsystem	25
2.2.2 Mechanical subsystem	30
2.2.3 Modelling of the complete system	31
2.3 Model identification	33
2.3.1 Nonlinear optimisation-based parameter identification	33
2.3.2 Model identification of the hydrostatic transmission	34
3 State and disturbance estimation	39
3.1 Observability	41
3.2 Nonlinear reduced-order observer	43
3.3 Extended Kalman Filter	47
3.4 Sigma-Point Kalman Filter	50
4 Model-based decentralised control design	53
4.1 Preliminaries	53
4.1.1 Stability of autonomous systems	53
4.1.2 Differential flatness	56

4.1.3	Passivity	59
4.2	Control scheme of the hydrostatic transmission	61
4.2.1	Centralised control scheme	61
4.2.2	Decentralised control scheme	66
4.3	Control design of the normalised bent-axis angle	67
4.3.1	Flatness-based control	68
4.3.2	Passivity-based control	70
4.3.3	Proportional-integral (PI) state feedback control	72
4.4	Control design of the motor angular velocity	74
4.4.1	Flatness-based control	75
4.4.2	Backstepping control	77
4.4.3	Passivity-based control	83
4.4.4	Extended linearisation control	86
4.4.5	State-dependent Riccati equation control	93
4.4.6	Nonlinear model predictive control	96
5	Experimental validation and robustness analysis	107
5.1	Numerical evaluation criteria	107
5.2	Desired trajectories of the controlled variables	108
5.3	Comparison of state and disturbance estimators	110
5.3.1	Simulation results	110
5.3.2	Experimental results	112
5.3.3	Summary	114
5.4	Control performance comparison	114
5.4.1	Control of the normalised bent-axis angle $\tilde{\alpha}_M$	115
5.4.2	Control of the motor angular velocity ω_M	117
5.5	Robustness analysis	126
5.6	Torque control	130
5.7	Comparison of different centralised control schemes	131
6	Conclusion and perspective	133
	Bibliography	135
	Lebenslauf	147