Saman Khodaverdian

Reglerentwurf zur Synchronisierung linearer heterogener Multi-Agenten- Systeme

Reglerentwurf zur Synchronisierung linearer heterogener Multi-Agenten-Systeme

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Saman Khodaverdian, M.Sc.

geboren am 10. Juni 1988 in Teheran, Iran

Referent: Prof. Dr.-Ing. J. Adamy
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lohmann
Tag der Einreichung: 16. Juni 2017
Tag der mündlichen Prüfung: 27. September 2017

D17
Darmstadt 2017

Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik

Saman Khodaverdian

**Reglerentwurf zur Synchronisierung
linearer heterogener Multi-Agenten-Systeme**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5605-1

ISSN 0945-1005

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 Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Regelungsmethoden und Robotik des Instituts für Automatisierungstechnik und Mechatronik an der TU Darmstadt von April 2013 bis März 2017.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Adamy, danke ich herzlich für die Möglichkeit und Unterstützung, diese Arbeit an seinem Fachgebiet anzufertigen. Die hervorragende Arbeitsatmosphäre und der erforderliche Freiraum haben es mir nicht nur ermöglicht eigene Ideen zu entwickeln und zu verfolgen, sondern auch sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Lohmann danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats sowie seine Anmerkungen und Anregungen.

Für die außerordentlich gute Arbeitsatmosphäre bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets. Durch die enge Zusammenarbeit wurden nicht nur fachliche Probleme diskutiert, sondern auch enge kollegiale und freundschaftliche Verbindungen geschaffen. Hierfür bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen herzlichst. Ein besonderer Dank geht an Sebastian Bernhard, Jonathan Hermann, Nicolai Schweizer und Tatiana Tatarenko für die kritische Durchsicht der Arbeit und ihre wertvollen Kommentare.

Bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft bedanke ich mich für die Förderung durch ein Stipendium. Dies umfasste sowohl eine finanzielle als auch eine immaterielle Unterstützung in Form von Seminaren und den Austausch mit anderen Stipendiaten.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich stets unterstützt und moralisch aufgebaut hat. Vor allem danke ich meiner Mutter, die mir den Weg zur Promotion ermöglicht und mich jederzeit gefördert hat. Nicht zuletzt gilt ein herzlicher Dank meiner Frau Atefeh, die mich auf meinem Weg begleitet und bedingungslos unterstützt. Ohne ihren Rückhalt wäre diese Arbeit undenkbar gewesen.

Für meine Mutter

und in liebevoller Erinnerung an meinen Vater.

Inhaltsverzeichnis

Symbole	VII
Kurzfassung	XI
1 Einleitung	1
1.1 Literaturübersicht und Stand der Technik	4
1.2 Ziele und Beiträge der Arbeit	13
1.3 Aufbau der Arbeit	15
2 Mathematische und regelungstechnische Grundlagen	16
2.1 Graphentheorie	16
2.1.1 Begriffe und Definitionen	16
2.1.2 Assoziierte Matrizen	19
2.2 Trajektorienfolgeregelung	21
2.3 Entkopplung durch parametrische Regelung	28
2.3.1 Stand der Technik und Beiträge dieses Abschnittes	28
2.3.2 Quadratische Systeme	31
2.3.3 Überaktuierte Systeme	50
2.3.4 Fazit	62
3 Synchronisierung homogener Agenten	64
3.1 Problemstellung	64
3.2 Beiträge dieses Kapitels	66
3.3 Reglerentwurf zur Synchronisierung	67
3.3.1 Synchronisierungsbedingung	67
3.3.2 Synchronisierungstrajektorie	71
3.3.3 Synchronisierungsverstärkung	75
3.3.4 Individuelle Synchronisierungsverstärkungen	79
3.3.5 Fazit	85
3.4 Reglerentwurf im Falle eingeschränkter Informationen	86
3.4.1 Ein Wurzelortskurvenansatz für SISO-Systeme	88
3.4.2 Beobachterbasierte Synchronisierung	103

3.4.3	Fazit	106
3.5	Zusammenfassung des Kapitels	107
4	Synchronisierung heterogener Agenten	108
4.1	Problemstellung	108
4.1.1	Inneres-Modell-Prinzip der Synchronisierung	109
4.1.2	Stand der Technik	112
4.2	Beiträge dieses Kapitels	115
4.3	Reglerentwurf für teilweise heterogene Agenten	116
4.3.1	SISO-Agenten	116
4.3.2	Anwendbarkeit im MIMO-Fall	126
4.3.3	Synchronisierungsregler reduzierter Ordnung	130
4.3.4	Fazit	142
4.4	Reglerentwurf für vollständig heterogene Agenten	143
4.4.1	Vollständig homogenisierbare Agenten	144
4.4.2	Teilweise homogenisierbare Agenten	156
4.4.3	Beispiel Brückenkräne	168
4.4.4	Anmerkungen und Hinweise zum Entwurf	172
4.4.5	Fazit	173
4.5	Zusammenfassung des Kapitels	174
5	Zusammenfassung und Ausblick	176
A	Mathematischer Anhang	180
A.1	Matrizen: Eigenschaften und Rechenregeln	180
A.2	Kronecker-Produkt	181
B	Parameter der Beispiele	182
B.1	Entkopplungsregler aus Abschnitt 2.3	182
B.2	Synchronisierungsregler aus Abschnitt 4.3.1	183
B.3	Brückenkräne aus Abschnitt 4.4.3	184
C	Grundbegriffe der Systemtheorie	185
	Literaturverzeichnis	187