

Programm

Kurzfassungen zum Download unter:

www.iosb.fraunhofer.de/?Boppard

Mittwoch, 4. März 2015

nachmittags **Anreise**
18:00 **Abendessen** im Rheinhotel Bellevue

Donnerstag, 5. März 2015

08:15 – 08:30 Eröffnung und Begrüßung (Stadthalle, Haupttagungsraum im EG)
Prof. Dr.-Ing. A. Fay

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG	
08:30 – 10:00	Folgeregelung Sitzungsleitung: Prof. Bohn	Antriebsregelung Sitzungsleitung: Prof. Roppenecker	
08:30 – 09:00	Multiresonante Modellfolgeregulierung für Transversalflussmaschinen <i>Jan Klöck (Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Braunschweig, Prof. Schumacher, Gr. 4)</i>	Modellbasierte Prädiktive Motorenregelung <i>Thivaharan Albin (Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen, Prof. Abel, Gr. 1)</i>	
09:00 – 09:30	Trajektorienfolgeregulierung für eine adaptive gekoppelte Balkenstruktur <i>Andreas Kater (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Prof. Meurer, Gr. 24)</i>	Kombinierte Radschlupf- und Momentenregelung für ein hybrides Bremssystem <i>Clemens Satzger (Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Dr. Bals, Gr. 12)</i>	
09:30 – 10:00	Beiträge zur Positionsregelung für Multi-kopter: Theorie und Praxis <i>Matthias Konz, David Kastelan (Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes, Prof. Rudolph, Gr. 25)</i>	Unified Passivity-based Cartesian Force/Impedance Control for Rigid and Flexible Joint Robots via Task-Energy Tanks <i>Christopher Schindlbeck (Institut für Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Prof. Haddadin, Gr. 14)</i>	

10:00 – 10:30 Kaffee-/ Teepause im Foyer der Stadthalle

10:30 – 12:00	Optimierungsprobleme (I) Sitzungsleitung: Prof. Streif	Flachheitsbasierte Steuerung und Regelung Sitzungsleitung: Prof. Michels	
10:30 – 11:00	Zur Bedeutung von Dissipativität und Durchschnittsbeschränkungen bei der ökonomischen prädiktiven Regelung <i>Matthias A. Müller (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Allgöwer, Gr. 27)</i>	Entwurf einer flachheitsbasierten Steuerung für kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke <i>Lutz Hanel (Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Scheffknecht, Gr. 16)</i>	

11:00 – 11:30	Modellprädiktive Regelung basierend auf relaxierten Barrierefunktionen <i>Christian Feller (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Ebenbauer, Gr. 28)</i>	Zum flachheitsbasierten Steuerungsentwurf für quasilineare verteiltparametrische Systeme <i>Torsten Knüppel, Frank Woittennek (Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, Technische Universität Dresden, Prof. Röbenack, Gr. 9)</i>
11:30 – 12:00	Reglerentwurf für verteilte nicht-lineare, heterogene Systeme bei zeitlich veränderlicher Interaktionstopologie mit Hilfe multipliiert-basierter konvexer Optimierungsmethoden <i>Christian Hoffmann (Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, Prof. Werner, Gr. 13)</i>	Flachheitsbasierte Regelung eines hochdynamischen hydraulischen Hexapoden mit Sliding-Mode-Beobachtern <i>Sarah Flottmeier (Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Prof. Trächtler, Gr. 23)</i>

12:00 - 14:30 Mittagessen im Rheinhotel Bellevue / Pause

14:30 – 16:00	Vernetzte Systeme (I) Sitzungsleitung: Prof. Hagenmeyer	Modellbasierte Identifikation, Prognose und Regelung Sitzungsleitung: Prof. Sawodny
14:30 – 15:00	Strukturelles und analytisches Modell des Zeitverhaltens von Steuerungssystemen <i>Stephan Höme (Institut für Automatisierungstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Prof. Diedrich, Gr. 20)</i>	Modellbasierte Identifikation fraktionaler Systeme <i>Marius Eckert (Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Prof. Hohmann, Gr. 17)</i>
15:00 – 15:30	Stabilität und Leistungsaufteilung in Microgrids <i>Johannes Schiffer (Fachgebiet Regelungssysteme, Technische Universität Berlin, Prof. Raisch, Gr. 2)</i>	Modellgestützte Prognosen für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung von Unsicherheiten in dynamischen Umgebungen <i>Javier A. Oliva Alonso (Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, Technische Universität Dortmund, Prof. Bertram, Gr. 8)</i>
15:30 – 16:00	Adaptive stabilizer for unknown nonlinear dynamic MIMO system using a cognitive-based framework <i>Xi Nowak (Steuerung, Regelung und Systemdynamik, Universität Duisburg-Essen, Prof. Söffker, Gr. 11)</i>	Modellbasierte Regelung eines Lasergenerierprozesses <i>Volker Renken (BIMAQ, Universität Bremen, Nachfolger von Prof. Goch, Gr. 5)</i>

16:00 – 16:30 Kaffee-/ Teepause im Foyer der Stadthalle

16:30 – 17:30	Plenarvortrag im Haupttagungsraum EG „Wandlungsfähigkeit technischer und wirtschaftlicher Systeme“ <i>Prof. Dr. Norbert Gronau, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Electronic Government, Universität Potsdam</i>
----------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

17:30 – 18:00 Vergabe der at-Preise
Auszeichnung herausragender Beiträge der Zeitschrift at-Automatisierungstechnik durch den Herausgeber

Hinweise zu wissenschaftlichen Veranstaltungen

Vorstellung der Neuberufenen

18:30 Abendessen im Rheinhotel Bellevue

Freitag, 6. März 2015

08:30 – 10:30 Vernetzte Systeme (II) Sitzungsleitung: Prof. Lohmann		Trajektorienplanung und Objekterkennung Sitzungsleitung: Prof. Adamy	
08:30 – 09:00	Synchronisierung heterogener linearer Systeme durch dezentrale Regelung <i>Jan Strubel (Fachgebiet Regelungstechnik, Technische Universität Darmstadt, Prof. Konigorski, Gr. 7)</i>		Regelung eines bionischen Kängurus <i>Sebastian Hentzelt (Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Prof. Graichen, Gr. 28)</i>
09:00 – 09:30	Optimale Synchronisation von Multiagentensystemen <i>Andrej Mosebach (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Lunze, Gr. 3)</i>		Experiments in time-optimal driving <i>Robin Verschueren (Lehrstuhl Systemtheorie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Prof. Diehl, Gr. 10)</i>
09:30 – 10:00	Verteilter Reglerentwurf in großen vernetzten Systemen mit lokalem Modellwissen <i>Frederik Deroo (Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung, Technische Universität München, Prof. Hirche, Gr. 21)</i>		Multi-Objekt-Tracking unter Verwendung von Random Finite Sets <i>Stephan Reuter (Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Prof. Dietmayer, Gr. 28)</i>
10:00 – 10:30	Synchrone und asynchrone hierarchische Regelung verkoppelter Systeme <i>Martin Jilg (Regelungs- und Systemtheorie, Universität Kassel, Prof. Stursberg, Gr. 19)</i>		Bag of Visual Words für die automatische Schüttgutsortierung <i>Matthias Richter (Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Prof. Beyerer, Gr. 18)</i>

10:30 – 11:00 Kaffee-/ Teepause im Foyer der Stadthalle

11:00 – 12:00 Optimierungsprobleme (II) Sitzungsleitung: Prof. Horn		Steuerbarkeit Sitzungsleitung: Prof. Leonhardt	
11:00 – 11:30	Optimale Regelung für hybrid dynamische Systeme auf Basis der dynamischen Programmierung <i>Simon Schmidt (Institut für Produkt- und Prozessinnovation, Leuphana Universität Lüneburg, Prof. Mercorelli, Gr. 6)</i>		Ein Algorithmus mit linearer Laufzeit zum Nachweis der strengen strukturellen Steuerbarkeit <i>Alexander Weber, Gunther Reissig (Institut für Steuer- und Regelungstechnik, Universität der Bundeswehr München, Prof. Svaricek, Gr. 22)</i>
11:30 – 12:00	Hochdynamische Oberleitungs-Emulation eines Pantographen-Prüfstands: Modellierungs- und Regelungs-Konzepte <i>Alexander Schirrer (Institut für Mechanik und Mechatronik, Technische Universität Wien, Prof. Jakubek, Gr. 29)</i>		Analyse und Ordnungsreduktion von Modellen der Glukose-Insulin-Homöostase auf Basis Empirischer Gramscher Matrizen <i>Christian Tolks (Fachgebiet Systemanalyse, Technische Universität Ilmenau, Prof. Ament, Gr. 15)</i>

12:00 – 12:30 Abschluss im Haupttagungsraum EG

Preisverleihung durch die WAGO Kontakttechnik GmbH & Co.KG, Minden

Aufruf für Boppard 2016

12:30 - 13:30 Mittagessen im Rheinhotel Bellevue

13:30 Ende des Kolloquiums

Modellbasierte Prädiktive Motorenregelung

Thivaharan Albin*

* Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen University
Steinbachstraße 54, 52074 Aachen
Tel.: 0241 / 80 27481
Fax: 0241 / 80 22296
T.Albin@irt.rwth-aachen.de

Dirk Abel **

** Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen University
Steinbachstraße 54, 52074 Aachen
Tel.: 0241 / 80 27500
Fax: 0241 / 80 22296
D.Abel@irt.rwth-aachen.de

Schlüsselwörter: Modellbasierte Regelung, Motorenregelung, Luftpfadregelung

Fortwährende Bestrebungen im Bereich der Verbrennungsmotorenentwicklung sehen eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitiger Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte für Schadstoffemissionen und des Fahrkomforts vor. Es lässt sich hierbei ein starker Trend zur Verbesserung der Motoreigenschaften durch Generierung neuer Variabilitäten erkennen, welche durch zusätzliche oder verbesserte Aktorik ermöglicht werden. Ein Beispiel hierfür ist die Abgasurboaufladung, welche einen Baustein zur Realisierung von „Downsizing“-Konzepten darstellt, bei der durch die Reduzierung des Motorhubvolumens eine Wirkungsgradsteigerung erreicht wird. Die Zunahme der Variabilitäten hat zur Folge, dass die Komplexität der zu Grunde liegenden Steuerungs-/Regelungsfunktionen, sowie der zugehörige Applikationsaufwand in zunehmendem Maße steigt [1]. Eine Möglichkeit zur Beherrschung dieser wachsenden Anforderungen bieten Modellbasierte Regelungskonzepte, wobei insbesondere die Modellbasierte Prädiktive Regelung großes Potential besitzt. In dem Vortrag wird ein Ansatz zur systematischen Reglersynthese aufgezeigt. Die Umsetzung wird beispielhaft für eine zweistufige Abgasurboaufladung beim Ottomotor demonstriert.

Die zweistufige Abgasurboaufladung ermöglicht eine Entschärfung des Zielkonfliktes (hohe spezifische Leistung gegenüber gutem Transientverhalten), durch Verwendung einer kleinen, hochdynamischen Hochdruck-Stufe und einer großen, trägeren Niederdruck-Stufe. Die zweistufige Abgasurboaufladung wird beim Dieselmotor bereits angewendet [2], ist allerdings beim Ottomotor aktuell noch Gegenstand der Forschung. Im Vergleich zum Dieselmotor ergeben sich beim

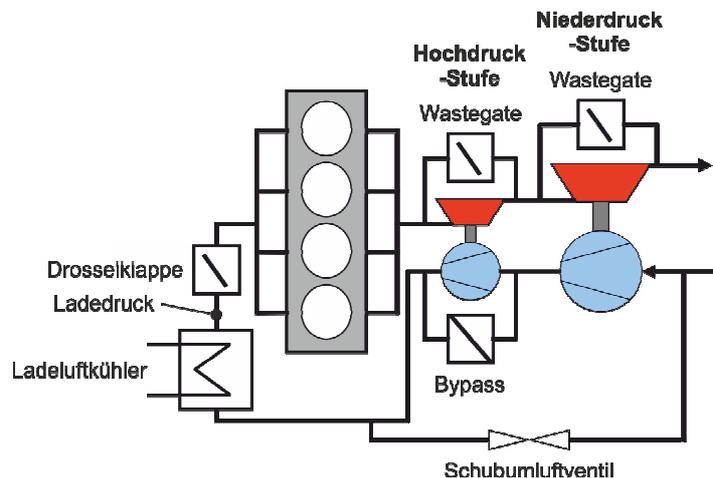


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines zweistufigen Luftpfads

Ottomotor, durch das bei homogenen Konzepten einzuhaltende stöchiometrische Luftverhältnis, erhöhte Anforderungen an die Regelung. Einer der Folgen des homogenen Konzeptes ist die direkte Kopplung zwischen Ladedruck und der resultierenden Last. Die Qualität der Regelung wirkt sich somit beim Ottomotor unmittelbar auf das Antriebsmoment und damit auf den Fahrkomfort aus.

Zur Ableitung des reglerinternen Modells, simulativen Parametrierung und Validierung des Regelungskonzeptes wird ein detailliertes Modell der Regelstrecke benötigt. Das entwickelte Modell besitzt einen modularen Aufbau, d.h. das gesamte System wird in einzelne Teilsysteme, wie bspw. Verdichter, Turbinen oder Wärmeübertrager eingeteilt, welche anschließend physikalisch modelliert werden. Die modulare Struktur bietet den Vorteil, dass Änderungen im Aufbau des Gesamtsystems oder andere Luftpfadtopologien sehr schnell abgebildet werden können. Somit ist eine hohe Wiederverwendbarkeit der Module gewährleistet.

Für das reglerinterne Modell der MPR werden, von dem physikalischen Modell ausgehend, stückweise affine (PWA) Modelle identifiziert [3]. Zur Identifikation der Modelle wurden Hinging-Hyperplane Verfahren verwendet, die es erlauben aus dem nichtlinearen System mit hoher Anzahl an Zuständen einen nichtlinearen, niederdimensionalen Zusammenhang zu erzeugen, welcher für eine Echtzeit-Optimierung zur Laufzeit geeignet ist. Innerhalb der MPR wird ein zweistufiger Optimierungsansatz verfolgt. Dieser besteht aus einer stationären Zielwertberechnung und der dynamischen Kompensation der Systemdynamik [4]. Durch dieses Verfahren können neben der reinen Folgeregelung, zusätzliche Anforderungen realisiert werden. Hierzu gehört die Einhaltung von Stellgrößenbegrenzungen und Bauteilschutzfunktionen, z. B. ausreichender Abstand zur Pumpgrenze, es lassen sich aber auch ökonomische Aspekte der Prozessführung berücksichtigen. In Folge dessen kann sowohl ein schnelles transientes Ansprechverhalten realisiert, als auch stationär bspw. wirkungsgradoptimale Stellgrößenkombinationen aktuiert werden.

Die Validierung der Regelung erfolgte durch Einsatz im Fahrzeug mit Messungen auf der Straße. In diesen Messungen hat sich der Regelungsansatz als zielführend erwiesen. Der Ladedruck wird, unter Beibehaltung eines hohen Fahrkomforts, zufriedenstellend eingeregelt. Hierbei kann der geringe Fahrzeugeinsatz, aufgrund des modellbasierten Ansatzes, hervorgehoben werden. Für die Inbetriebnahme, Applikation und Validierung der Regelung bis zu einem ersten gut lauffähigen System, welches für den Straßenverkehr geeignet war, wurden insgesamt 3 Testtage mit je 2-3 Stunden Zeit im Fahrzeug benötigt.

Literatur:

- [1] R. Isermann: Engine Modeling and Control, Springer, 2014
- [2] D. Schwarzmann, J. Lunze, A. Schanz: Pressure Control of a Two-Stage Turbocharged Diesel Engine using a Novel Nonlinear IMC Approach, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006
- [3] T. Albin, P. Drews, F.-J. Heßeler, A.-M. Ivanescu, T. Seidl, D. Abel: A hybrid control approach for low temperature combustion engine control. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference , 2011
- [4] T. Albin, R. Zweigel, F.-J. Heßeler, D. Abel: A 2-stage MPC Approach for the Cycle-To-Cycle Dynamics of GCAI (Gasoline Controlled Auto Ignition), Proceedings of Advances in Automotive Control, 2013

Stabilität und Leistungsaufteilung in Microgrids

Johannes Schiffer und Jörg Raisch

Fachgebiet Regelungssysteme
Technische Universität Berlin
Einsteinufer 17, 10587 Berlin
Tel: 030 314-23573
Fax: 030 314-21137
{schiffer,raisch}@control.tu-berlin.de

Schlüsselwörter: Microgrid-Regelung; Droop-Regelung; Frequenzstabilität; Spannungsstabilität; Leistungsaufteilung; port-Hamiltonsche Systeme; konsensbasierte Regelung

Das Microgrid-Konzept stellt einen vielversprechenden Lösungsansatz dar, um die lokale Integration und Regelung von erneuerbaren Energien zu vereinfachen [1]. Ein typisches Microgrid besteht aus verschiedenen Erzeugungseinheiten, Lasten und Speicherelementen, die lokal (auf der Verteilnetzebene) zu einer regelbaren Einheit zusammengefasst werden (siehe Abbildung 1). Ein Microgrid kann sowohl an ein Verbundnetz gekoppelt betrieben werden, als auch isoliert als Inselnetz.

Drei wesentliche Gütekriterien für den Betrieb von Microgrids sind Frequenzstabilität, Spannungsstabilität, sowie Leistungsaufteilung. Ein weitverbreitetes dezentrales Regelschema ist die sogenannte Droop-Regelung [2]. In diesem Vortrag werden zunächst die gängigsten Droop-Regelgesetze für wechselrichterbasierte Microgrids mit stark induktiven elektrischen Leitungen erläutert. Danach wird unter Annahme vernachlässigbarer Wirkleitwerte eine port-Hamiltonsche Darstellung [3] eines droop-geregelten Microgrids aufgezeigt, auf deren Grundlage hinreichende Bedingungen für lokale Stabilität abgeleitet werden [4]. Des Weiteren wird ein Auswahlkriterium für die Reglerparameter vorgestellt, das stationär eine gewünschte Wirkleistungsaufteilung sichert.

Die durchgeführten Analysen zeigen, dass mit Hilfe der Droop-Regelung im Allgemeinen keine gewünschte Blindleistungsaufteilung erreicht werden kann. Deshalb wird in diesem Beitrag zudem ein alternatives konsensbasiertes Spannungsregelgesetz vorgestellt, das das Problem der Blindleistungsaufteilung löst [5]. Die wesentlichen Eigenschaften des resultierenden Regelkreises werden diskutiert. Die Analyse wird anhand von Simulationsbeispielen auf Basis des CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques) Benchmark-Mittelspannungsnetzwerks [6] veranschaulicht.

Die beschriebenen Ergebnisse resultieren aus einer engen Zusammenarbeit zwischen dem Laboratoire des Signaux et Systèmes, École Supérieure d'Electricité (SUPELEC), Frankreich (Romeo Ortega), der Siemens AG, Sektor Infrastructure & Cities, Division Smart Grid (Tevfik Sezi) und dem Fachgebiet Regelungssysteme der Technischen Universität Berlin (Johannes Schiffer, Thomas Seel, Jörg Raisch).

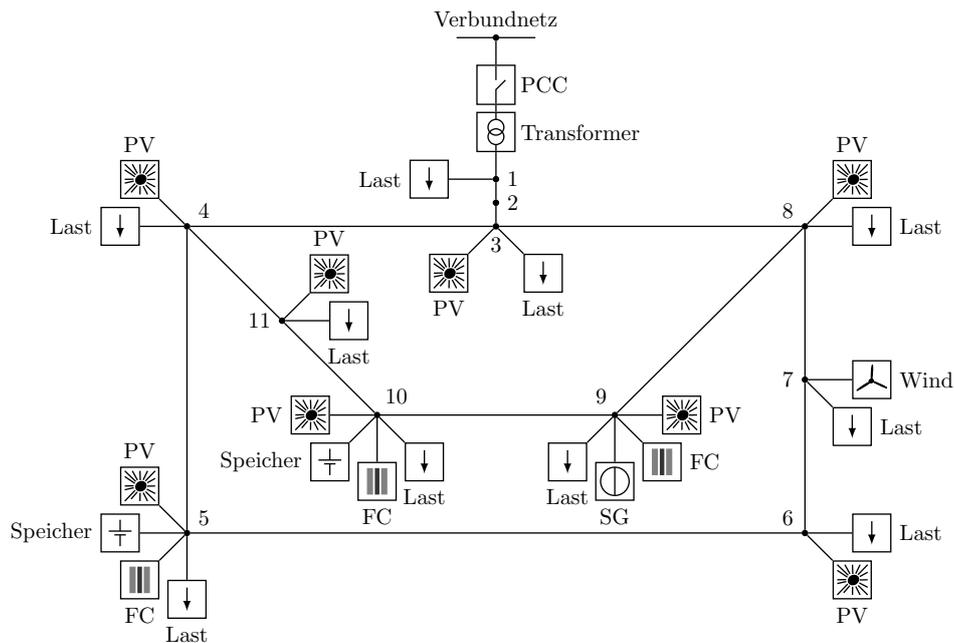


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Microgrids. FC–Brennstoffzelle; SG–Synchrongenerator; PV–Photovoltaikanlage; PCC–Netzanschlusspunkt.

Literatur

- [1] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, “Microgrids,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, 2007.
- [2] J. Guerrero, P. Loh, M. Chandorkar, and T. Lee, “Advanced control architectures for intelligent microgrids – part I: Decentralized and hierarchical control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1254–1262, 2013.
- [3] R. Ortega, A. van der Schaft, B. Maschke, and G. Escobar, “Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems,” *Automatica*, vol. 38, no. 4, pp. 585–596, 2002.
- [4] J. Schiffer, R. Ortega, A. Astolfi, J. Raisch, and T. Sezi, “Conditions for stability of droop-controlled inverter-based microgrids,” *Automatica*, vol. 50, no. 10, pp. 2457–2469, 2014.
- [5] J. Schiffer, T. Seel, J. Raisch, and T. Sezi, “A consensus-based distributed voltage control for reactive power sharing in microgrids,” in *13th European Control Conference*, Strasbourg, France, 2014, pp. 1299–1305.
- [6] K. Rudion, A. Orths, Z. Styczynski, and K. Strunz, “Design of benchmark of medium voltage distribution network for investigation of DG integration,” in *IEEE PESGM*, 2006.

Optimale Synchronisation von Multiagentensystemen

Andrej Mosebach *

Jan Lunze **

* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und
Prozessinformatik (ATP)
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
Tel. 0234 32 26632
Fax 0234 32 14101
mosebach@atp.rub.de

** Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und
Prozessinformatik (ATP)
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
Tel 0234 32 24071
Fax 0234 32 14101
lunze@atp.rub.de

Schlüsselwörter: Synchronisation, Multiagentensysteme, optimale Regelung, Übergangsverhalten, digital vernetzte Systeme

Das Ziel der Synchronisation von Multiagentensystemen ist es, dynamische Teilsysteme aus unterschiedlichen Anfangszuständen auf eine gemeinsame Trajektorie zu führen. In diesem Vortrag werden zwei Verfahren zum Entwurf synchronisierender Regelungen präsentiert, die die folgenden Forderungen an das vernetzte Multiagentensystem erfüllen:

1. **Asymptotische Synchronisation:** Die Teilsysteme sollen sich asymptotisch einer instabilen Trajektorie $x_s(t)$ annähern:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_s(t)\| = 0.$$

2. **Optimale Synchronisation:** Zusätzlich zu der üblichen Forderung nach *asymptotischer Synchronisation* soll die Regelung das Übergangsverhalten durch Minimierung des folgenden Gütefunktional verbessern:

$$J = \int_0^{\infty} \sum_{i,j} (x_i^T(t) - x_j^T(t)) Q_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) + u_i^T(t) R_i u_i(t) dt.$$

Die Synchronisation vernetzter Multiagentensysteme lässt sich nur dann erreichen, wenn relative Informationskopplungen zwischen den Teilsystemen eingeführt werden, über die sich die Teilsysteme direkt oder indirekt gegenseitig beeinflussen [1, 2].

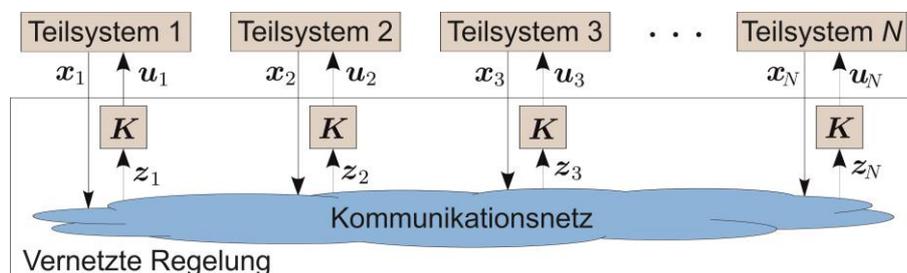


Abbildung 1: Vernetztes Multiagentensystem

Abbildung 1 zeigt den typischen Aufbau eines vernetzten Multiagentensystems, welches sich aus N Teilsystemen und der vernetzten Regelung zusammensetzt. Das Kommunikationsnetz bildet mit den lokalen Reglern K die vernetzte Regelung, die die zur Synchronisation notwendige Kopplung zwischen den Teilsystemen herstellt.

Die vorgestellten Entwurfsverfahren wurden unter Verwendung von Methoden der optimalen Regelung erarbeitet. Im Unterschied zum klassischen Optimalreglerentwurf soll die Regelung nicht die Stabilität der Teilsysteme sichern. Die gestellten Forderungen werden auch dann erfüllt, wenn die Teilsysteme instabil sind. Dafür wird im ersten Schritt gezeigt, dass die Lösung des Optimierungsproblems

$$\min_{u_i(t)} J$$

ein zentraler Regler ist, der die Anforderungen an die gegebene Struktur des Kommunikationsnetzes nicht erfüllt. Weiterhin lässt sich aus dem Ergebnis schließen, dass zur Synchronisation eine Rückführung relativer Zustandsgrößen notwendig ist.

Um die Anforderungen an die Struktur des Kommunikationsnetzes zu erfüllen, wird in dem ersten vorgestellten Entwurfsverfahren eine Approximation der optimalen Lösung erarbeitet [3]. Für den Fall eines vollständigen Kommunikationsnetzwerks wird gezeigt, dass die approximierten vernetzte Regelung identisch zur optimalen Lösung ist.

In dem zweiten Entwurfsverfahren wird das Optimierungsproblem um eine Nebenbedingung erweitert, welche die Struktur des Kommunikationsnetzes berücksichtigt [4]. Für dieses nicht konvexe Optimierungsproblem wird eine notwendige Bedingung abgeleitet und gezeigt, dass zur Bestimmung des optimalen Reglers ein komplexes nichtlineares Gleichungssystem gelöst werden muss. Da die Lösung dieses Optimierungsproblems numerisch aufwendig ist, wird ein Gradientenverfahren vorgeschlagen, welches eine gegebene asymptotisch synchronisierende Regelung so verändert, dass diese zusätzlich die Forderung nach *optimaler Synchronisation* erfüllt.

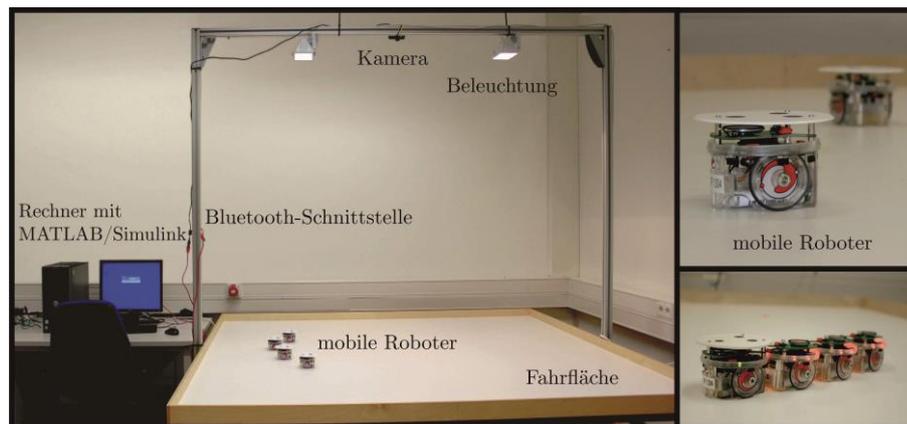


Abbildung 2: Versuchsanlage SAMS (**S**ynchronization of **A**utonomous **M**obile **S**ystems)

Beide Reglerentwurfsverfahren wurden experimentell anhand der Synchronisation der lateralen Bewegung mobiler Roboter erprobt. Abbildung 2 zeigt den zugehörigen Versuchsaufbau des Lehrstuhls.

Literatur:

- [1] J. Lunze: Synchronisierbarkeit autonomer Agenten durch vernetzte Regelungen. *Automatisierungstechnik* 59(9), 2011.
- [2] J. Lunze: Synchronization of heterogeneous agents. *IEEE Transactions on Automatic Control* 57(11), 2012.
- [3] A. Mosebach, J. Lunze: LQR design of synchronizing controllers for multi-agent systems. *Automatisierungstechnik*, 2014, eingereicht.
- [4] A. Mosebach, J. Lunze: Synchronization of autonomous agents by an optimal networked controller. *In Proc. of 13th European Control Conference*, 2014.

Multiresonante Modellfolgeregelung für Transversalflussmaschinen

Jan Klöck *

* Institut für Regelungstechnik
 Technische Universität Braunschweig
 Hans-Sommer-Straße 66, 38106 Braunschweig
 Tel.: 0531 / 391-3833
 Fax: 0531 / 391-5194
 E-Mail: kloeck@ifr.ing.tu-bs.de

Walter Schumacher **

** Institut für Regelungstechnik
 Technische Universität Braunschweig
 Hans-Sommer-Straße 66, 38106 Braunschweig
 Tel.: 0531 / 391-3836
 Fax: 0531 / 391-5194
 E-Mail: w.schumacher@tu-bs.de

Schlüsselwörter: Multiresonante Reglerstruktur, Modellfolgeregelung, Transversalflussmaschine

Transversalflussmaschinen [1] bilden einen eigenen Zweig elektrischer Maschinen. Die Transversalflussbauweise weist markante Unterschiede gegenüber klassischen Bauformen auf. Dies beinhaltet unter anderem die Magnetkrisenanordnung, die minimale Polteilung und die Verschaltung der Maschinenstränge [2]. Diese alternative Maschinenkonstruktion erlaubt die Auslegung von kompakten Antrieben mit hoher Energiedichte [3]. Die transversale Magnetkrisenanordnung wirkt sich jedoch negativ auf das Regelverhalten dieser elektrischen Maschinen aus.

Eine Herausforderung der Regelung von Transversalflussmaschinen ist die einphasige Konstruktion der Elementarmaschine. Während die Regelung von dreiphasigen Drehfeldmaschinen hinreichend in der Literatur beschrieben wird [4], ist für die Regelung von einphasigen Synchronantrieben mit variabler Grundfrequenz keine Lösung mit hinreichender Regelgüte verbreitet. Das nichtlineare dynamische Verhalten der Transversalflussmaschine und der erforderliche Betrieb mit Strömen der Grundfrequenz und zusätzlichen Stromharmonischen erhöht zusätzlich die Anforderungen an die Regelstruktur.

In diesem Vortrag wird ein nichtlineares, dynamisches Modell der einphasigen Transversalflussmaschine nach [5] vorgestellt und eine multiresonante Modellfolgeregelung abgeleitet.

Die modellbasierte Führungsregelung wird durch einen drehzahlabhängigen Zustandsregler realisiert. Hierzu wird zunächst ein Zustandsraummodell für

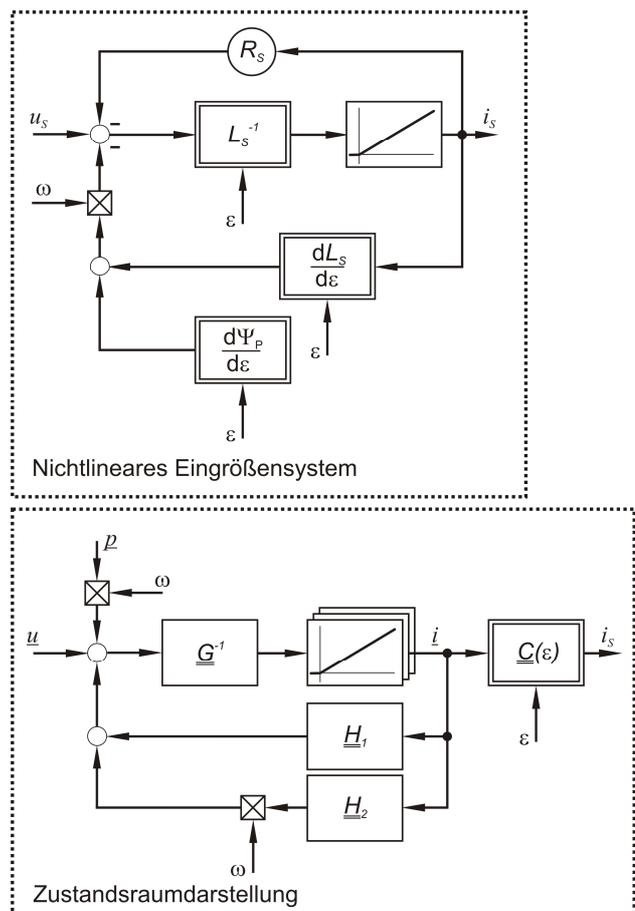


Abbildung 1: Ursprungs- und zustands-transformiertes System

die Stromharmonischen durch eine orthonormale Abbildung der Eingangsgröße u_S und der Zustandsgröße i_S hergeleitet (Abb. 1). Durch die Zustandsraumdarstellung der Stromharmonischen und die korrespondierende Zustandsregelung wird die Vorgabe des transienten Verhaltens für die Amplitude jeder berücksichtigten Frequenz ermöglicht.

Der Störregler wird durch eine multiresonante Struktur nach [6] ausgeführt (Abb. 2). Dieser harmonische Regler führt durch direkte Verwendung der gemessenen Rotorlage seine Resonanzen synchron der Maschinendrehzahl nach. Es wird gezeigt, dass der Regler im stationären Zustand bei konstanter Drehzahl stationäre Genauigkeit für alle berücksichtigten Stromharmonischen erreicht.

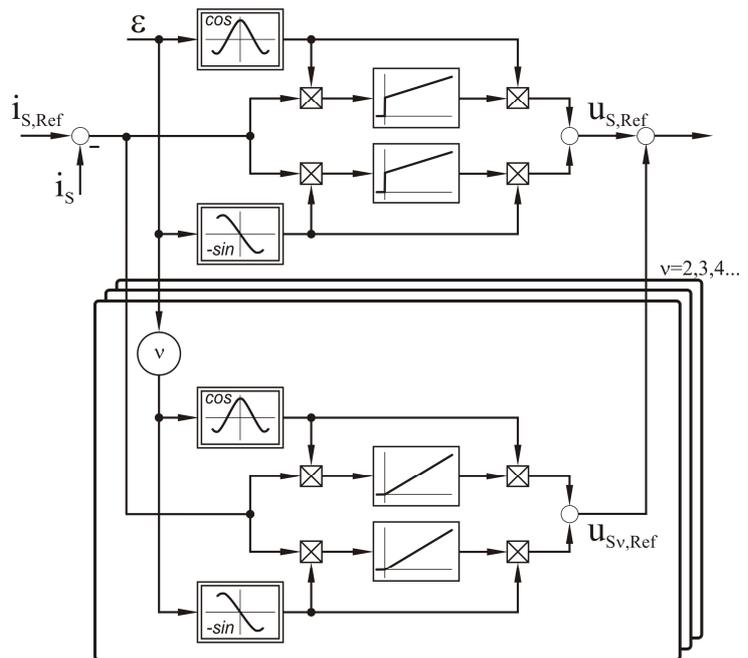


Abbildung 2: Multiresonanter Störregler

Literatur:

- [1] H. Weh, H. May, "Achievable force densities for permanent magnet excited machines in new configurations," *ICEM*, München 1986
- [2] H. Weh, *Elektrische Antriebe - Grundlagen*, Springer, 2013
- [3] M. Vinogradski, U. Werner, J. Schüttler, T. Petter, B. Orlik., "Generation of optimized current wave forms for the production of minimized cogging torque of transverse flux motors for direct drive applications," *EPE-PEMC*, Riga, Lettland, 2004
- [4] W. Leonhard, *Regelung elektrischer Antriebe*, Springer, 2000
- [5] J. Klöck, T. Orlik, W. Schumacher, "Modeling and torque ripple minimization of transverse flux machines," *EPE*, Lille, Frankreich, 2013
- [6] J. Klöck, W. Schumacher, "Harmonic current control for transverse flux machines," *PCIM*, Nürnberg, Deutschland

Modellbasierte Regelung eines Lasergenerierprozesses

Volker Renken *

* BIMAQ
Universität Bremen
Linzer Str. 13
0421/21864626
0421/21864670
ren@bimaq.de

Nachfolger von Prof. Goch**

** BIMAQ
Universität Bremen
Linzer Str. 13
0421/21864601
0421/21864670
gg@bimaq.de

Schlüsselwörter: Modellbasierte Regelung, SLM, Lasergenerieren, optische Sensorik

Lasergenerierverfahren (Selective Laser Melting - SLM) bieten große Potenziale bei der Herstellung von flexiblen und komplexen Bauteilen. Um Fehler in dieser vergleichsweise neuen Technologie zu vermeiden und die Bauteilqualität zu erhöhen, ist es ein aktuelles Ziel, Sensorik in den Prozess einzubinden und so eine Regelung der Prozessparameter zu ermöglichen. Erste Ansätze zur Messdatenerfassung mittels Diode und Regelung mit einem PI Regler sind bereits für den SLM Prozess vorhanden [1]. Modellbasierte Ansätze, die direkt auf einer Regelung der Qualitätsgröße basieren, haben ihre Eignung in verschiedenen Feldern gezeigt, beispielsweise bei der Herstellung von Wälzlagering [2] und bei der laserchemischen Produktion von Mikrobauanteilen [3]. Im SLM Prozess wird das Bauteil schichtenweise durch Aufschmelzung von Metallpulver mit einem gelenkten Laserstrahl unter einer Schutzgas-Atmosphäre generiert. Hierbei können in den optischen Pfad verschiedene Sensoren eingebracht werden, um Prozessinformationen für die Regelung zu erhalten (Abbildung 1).

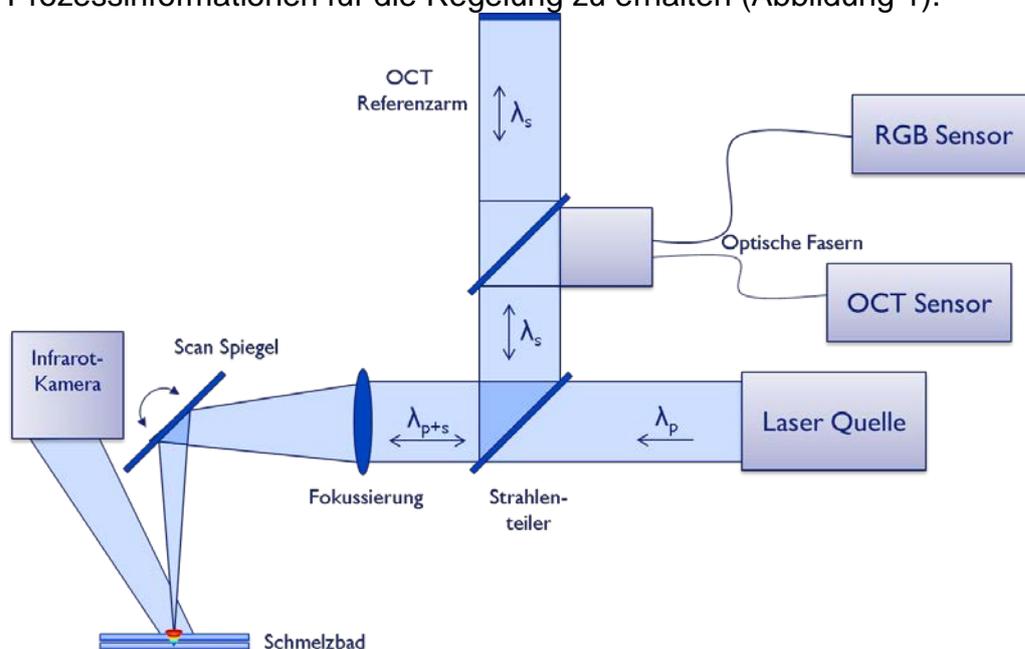


Abbildung 1: Optisches System des SLM Prozesses mit Sensoren

Im Forschungsprojekt Manufacturing Error-free Goods at First Time (MEGaFIT) besteht die Messgrößenerfassung aus drei Sensoren, hierbei beobachtet eine Infrarotkamera das Bauteil von der Seite außerhalb des Strahlengangs, während ein RGB-Sensor und ein OCT Sensor in den Strahlengang eingebunden sind. Der RGB Sensor erfasst Intensitäten der von der Oberfläche emittierten Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich der Farben Rot, Grün und Blau während der OCT-Sensor den Abstand zum Bauteil nach dem Messprinzip der optischen Kohärenztomographie erfasst. Die drei Sensoren wirken in drei unterschiedlichen Regelungskaskaden. Hierbei erkennt der OCT-Sensor zwischen den einzelnen Schichten der Bearbeitung Fehler am Bauteil und in der Pulverschicht. Die Infrarotkamera erkennt in der Bearbeitung von einzelnen Sektoren einer Schicht Temperaturdifferenzen und optimiert die Ausführungsreihenfolge der Sektoren, so dass Eigenspannungen im Material gemildert werden.

Für die modellbasierte Regelung werden die Intensitäten des RGB Sensors verwendet, um innerhalb eines Scanvektors die Prozessgrößen Temperatur und Schmelzbadgröße zu regeln. Hierbei werden neben der gemessenen Intensität auch die Geschwindigkeit der Bearbeitung und der Wärmefluss in die umgebenden Volumenelemente des Bauteils als Proximity Index berücksichtigt. Die aus Vorversuchen generierten Zusammenhänge zwischen der Ausgangsgröße Leistungsdifferenz und den drei Eingangsgrößen wurden in einem Simulink-Modell mit radialen Basisfunktionen umgesetzt und für die Anwendung auf einem Matlab XPC kompiliert. Die XPC Echtzeitsteuerung erreicht hierbei Zykluszeiten von 100µs, somit kann die Regelgröße innerhalb einzelner Scanvectoren geregelt werden und die Qualität durch konstantere Prozessgrößen verbessert werden.

Die Arbeiten für diese Forschungsergebnisse wurden durch das siebte Rahmenprogramm der Europäischen Kommission gefördert unter Grant Agreement No. FP7-285030.

Literatur:

- [1] Craeghs T.; Clijsters S.; Kruth JP.; Bechmann F.; Ebert M.C.: Detection of process failures in layerwise laser melting with optical process monitoring. 7th International Conference on Photonic Technologies, Fürth; 2012

- [2] Dijkman, M.: Automated compensation of distortion in the production process of bearing rings. Dissertation, Universität Bremen; 2009

- [3] Zhang, P.; Goch, G.: An in-process quality control concept for laser chemical machining. Proceedings of the 14th euspen International Conference, Dubrovnik; 2014

Optimale Regelung für hybrid dynamische Systeme auf Basis der dynamischen Programmierung

Simon Schmidt*

Paolo Mercorelli **

* Institut für Produkt- und Prozessinnovation
(PPI)

Leuphana Universität Lüneburg
Volgershall 1, 21339 Lüneburg
04131 677 5173
04131 677 5300
Simon.Schmidt@leuphana.de

** Institut für Produkt- und Prozessinnovation
(PPI)

Leuphana Universität Lüneburg
Volgershall 1, 21339 Lüneburg
04131 677 5571
04131 677 5300
Paolo.Mercorelli@leuphana.de

Schlüsselwörter: Hybrid dynamische Systeme, Optimale Regelung, Dynamische Programmierung, Bellman Optimalitätsprinzip

Dynamische Systeme werden für gewöhnlich klassifiziert als kontinuierliche oder als diskrete dynamische Systeme. Jedoch lassen sich reale Systeme oftmals nicht eindeutig in eine dieser Klassen einordnen. Oftmals enthalten reale dynamische Systeme kontinuierliche und auch diskrete Dynamiken. Diese Mischung aus kontinuierlichen und diskreten Dynamiken wird als hybrid dynamisches System (oder kurz: hybrides System) bezeichnet. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Längsdynamik eines Fahrzeugs mit Stufengetriebe genannt. Hierbei ist die Längsdynamik eine kontinuierlich und der gewählte Gang stellt eine diskrete Größe dar. [1] Die Betrachtung eines Systems als hybrides System bietet die Möglichkeit optimale Regelungen unter Einbeziehung aller vorkommenden Dynamiken zu entwerfen. Hierbei ist „Optimal“ immer im Sinne des Gütefunktional zu sehen. Es sind hier zum Beispiel energieoptimale oder zeitoptimale Regler denkbar. Beim Entwurf von optimalen Regelungen gibt es Grundsätzlich zwei Herangehensweisen: Zum einen das Pontryagin'sche Maximum Prinzip und zum anderen die dynamische Programmierung. Das Pontryagin'sche Maximum Prinzip stellt Bedingungen für ein Optimum dar. Diese sind jedoch oftmals nur notwendig und führen somit im Allgemeinen nur zu lokalen Optima und weiterhin oftmals nur zu optimalen Steuerungen. [2, 3, 4] Die andere Möglichkeit zur Lösung von Optimalsteuerungsproblemen neben dem Maximum Prinzip ist die Dynamische Programmierung, welche Richard Bellman auf den Bereich der Regelungstechnik aus der Physik übertrug, hierbei wird das Problem nicht geschlossen gelöst sondern in Teilintervalle unterteilt [5]. Es gilt hierbei: "If an optimal trajectory is broken in two pieces, then the last piece is itself optimal." [6] Dieses zunächst trivial erscheinende Prinzip hat in der Anwendung erhebliche Auswirkungen auf die Anzahl der notwendigen Berechnungen, weil bereits bekannte Ergebnisse wiederverwendet werden können. Da bei der dynamischen Programmierung alle zulässigen Steuerungen berechnet werden führt diese zu globalen Optima. Außerdem lässt sich hierbei ein Regelgesetz und nicht nur eine optimale Steuerung herleiten. [4,5]

In diesem Vortrag wird der Entwurf von optimalen Reglern für hybride Systeme auf Basis der dynamischen Programmierung vorgestellt. Hierzu wird als Beispiel die Längsdynamik eines PKWs mit Stufengetriebe betrachtet und hierfür ein optimaler Regler entworfen.

Literatur:

- [1] Sanfelice, Ricardo G.; Teel, Andrew R. (2012): Hybrid Dynamical Systems. Modeling, Stability, and Robustness: Princeton University Press.
- [2] Pontryagin, Lev Semenovich; Gamkrelidze, Revaz Valerianovič (op. 1986): The mathematical theory of optimal processes. Nachdruck. New York: Gordon and Breach Science Publishers (Classics of soviet mathematics, 4).
- [3] Kirk, Donald E. (1970): Optimal control theory;. An introduction. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall (Prentice-Hall networks series).
- [4] Bertsekas, Dimitri P. (1995): Dynamic programming and optimal control. Belmont, Mass.: Athena Scientific.
- [5] Bellman, Richard; Kalaba, Robert (1965): Dynamic programming and modern control theory. New York: Academic Press.
- [6] Knowles, Greg (1981): An introduction to applied optimal control. New York: Academic Press.
- [7] Bellman, Richard E. (1954): The Theory of Dynamic Programming. Santa Monica CA: Rand Corp.

Synchronisierung heterogener linearer Systeme durch dezentrale Regelung

Dipl.-Ing. Jan Strubel *

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski **

* Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik
Technische Universität Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt
Telefon: 06151 / 16-3114
Fax: 06151 / 16-6114
jstrubel@iat.tu-darmstadt.de

** Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik
Technische Universität Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt
Telefon: 06151 / 16-3014
Fax: 06151 / 16-6114
ukonigorski@iat.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: Synchronisierung, dezentrale Regelung, Multi-Agenten Systeme

Synchronisierung ist der Wortherkunft nach der Prozess, Vorgänge in zeitliche Übereinkunft zu bringen. In vielen technischen Anwendungen ist dies ein zentraler Aspekt, um den störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Beispielhaft sei hier die Frequenzregelung des elektrischen Energienetzes genannt, die insbesondere dann von Bedeutung ist, wenn nach Stromausfällen einzelne Netzsegmente wieder miteinander verschaltet und dabei synchronisiert werden müssen.

Neben dieser technischen Anwendung eines Synchronisierungsvorgangs wurde in der regelungstechnischen Literatur in den vergangenen Jahren verstärkt die Synchronisierung von Multi-Agenten Systemen untersucht. Hierbei handelt es sich zunächst um autonome und nicht physikalisch gekoppelte dynamische Systeme, die die Fähigkeit besitzen, über ein Netzwerk miteinander zu kommunizieren. Die aus dem Netzwerk empfangene Information wird dann von den lokalen Reglern der Teilsysteme verarbeitet, mit dem Ziel asymptotisch Übereinkunft in den Zuständen oder, je nach Aufgabenstellung, lediglich in Teilzuständen der Agenten zu erreichen. Erwähnenswert ist dabei die Tatsache, dass lediglich relative Information zur Synchronisierung kommuniziert wird und somit die messtechnische Erfassung des absoluten Zustandes oder Ausgangs des einzelnen Agenten nicht notwendigerweise vorausgesetzt werden muss. Erkaufte wird dies durch einen erhöhten Aufwand beim Entwurf der lokalen Regler, der nunmehr dezentral durchzuführen ist. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den strukturellen Aufbau eines solchen Multi-Agenten Systems mit drei Agenten. Hierbei ist bereits angedeutet, dass lediglich Ausgangsinformation kommuniziert wird und die Dynamik der Agenten nicht notwendigerweise identisch sein muss.

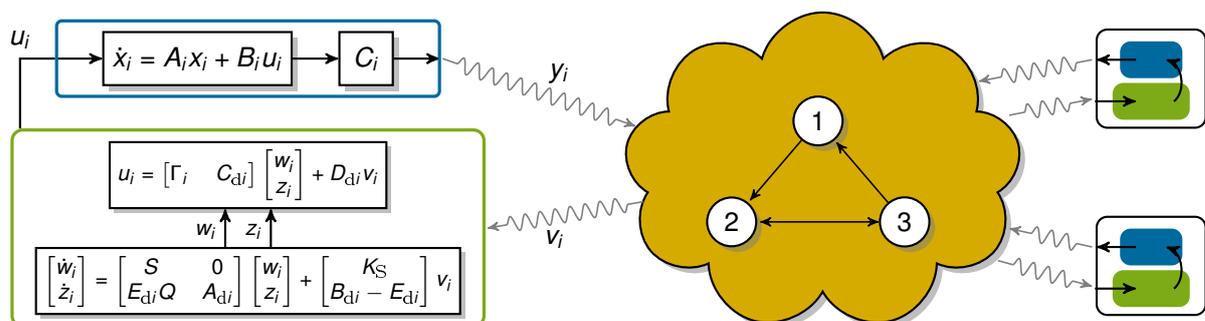


Abbildung 1: Strukturbild eines heterogenen Multi-Agenten Systems mit drei Agenten

Nachdem zunächst die Synchronisierung identischer Agenten untersucht wurde (eine Übersicht findet sich in [1]), wurden in der Literatur in den vergangenen Jahren ebenfalls Bedingungen zur Synchronisierung heterogener Multi-Agenten Systeme angegeben ([2], [3]). Notwendig ist dabei, dass die einzelnen Agenten ein identisches internes Modell besitzen müssen, welches nach der Synchronisierung eine gemeinsame Trajektorie vorgibt. Allerdings beruhen hinreichende Bedingungen oft auf der Kenntnis des absoluten Ausgangs [2] oder auf der Einschränkung der erlaubten Topologie des Netzwerks [3].

Daher wird in diesem Beitrag ein Entwurfsverfahren zur Bestimmung eines dezentralen Reglers vorgestellt, welches die Synchronisierung eines heterogenen Multi-Agenten Systems auf eine vorher festgelegte Trajektorie ermöglicht. Vorausgesetzt werden muss dabei lediglich, dass das Netzwerk einen Spannbaum enthält sowie die Rechtsinvertierbarkeit der individuellen Agentendynamik. Die Bestimmung der freien Parameter der lokalen Regler wird als min-max Optimierungsproblem formuliert, welches sich unter praktischen Gesichtspunkten einfach implementieren und lösen lässt. Darüber hinaus ist es durch weitere Einstellparameter des Optimierungsverfahrens möglich, Einfluss auf die Dynamik des Synchronisierungsfehlers nehmen, indem die korrespondierenden Eigenwerte in den in Abbildung 2 dargestellten Bereich der komplexen Ebene verschoben werden. Verifiziert werden die Ergebnisse durch ein Simulationsbeispiel.

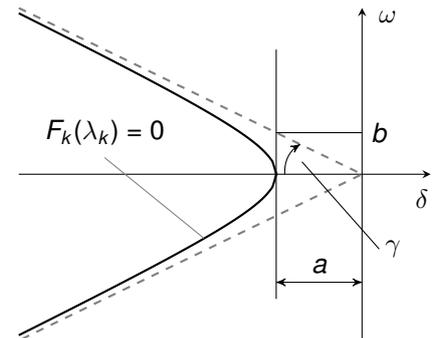


Abbildung 2: Erlaubter Bereich der Synchronisierungseigenwerte

Literatur:

- [1] R. Olfati-Saber, J. A. Fax und R. M. Murray. Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. *Proceedings of the IEEE*, 95(1): 215 – 233, 2007.
- [2] P. Wieland, R. Sepulchre und F. Allgöwer. An internal model principle is necessary and sufficient for linear output synchronization. *Automatica*, 47(5): 1068 – 1074, 2011.
- [3] J. Lunze. Synchronization of Heterogeneous Agents. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(11): 2885 – 2890, 2012.
- [4] J. Strubel, G.L. Stein und U. Konigorski. Synchronization of Heterogeneous Agents using Min-Max Optimization. *Eingereicht bei der IEEE American Control Conference*, 2015.

Modellgestützte Prognosen für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung von Unsicherheiten in dynamischen Umgebungen

Javier A. Oliva Alonso *

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram **

* Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik
Technische Universität Dortmund
Otto-Hahn-Str. 8, 44227 Dortmund
(+49) 231 755 4648
+49 231 755 2752
javier.oliva@tu-dortmund.de

** Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik
Technische Universität Dortmund
Otto-Hahn-Str. 8, 44227 Dortmund
(+49) 231 755 2760
+49 231 755 2752
torsten.bertram@tu-dortmund.de

Schlüsselwörter: modellgestützte Prognosen, Schätzung des Batterieladezustandes, Reichweitenschätzung für Elektrofahrzeuge

Aufgrund des wachsenden Einsatzes von elektrischen Energiespeichersystemen als Hauptenergiequelle für Elektrofahrzeuge in verschiedenen Anwendungsgebieten wie beispielsweise für die Nutzung in kommerziellen, militärischen oder Weltraumanwendungen, haben diese Art von Energiespeichersystemen an Bedeutung gewonnen. Unabhängig davon ob es sich um ein herkömmliches Elektroauto, ein motorisiertes Landfahrzeug zur Erkundung fremder Umgebungen oder um ein unbemanntes Luftfahrzeug handelt, wird in der Regel erwartet, dass derartige Elektrofahrzeuge eine gewisse und möglichst lange Autonomie gewährleisten, eine relativ kurze Zeit benötigen, um die erforderliche Energie zu speichern und für eine hohe Anzahl von Betriebszyklen anwendbar sind. Diese drei Aspekte sind allerdings durch den Degradationszustand und die Restnutzungsdauer des elektrischen Energiespeichersystems sowie von den Betriebsbedingungen des Elektrofahrzeugs in hohem Maße bestimmt. Diese Aspekte haben die Forschung und die Entwicklung von Diagnose- und Prognosealgorithmen angeregt und zu weiteren Ergebnissen gebracht, welche einerseits den Degradationszustand und andererseits die Restnutzungsdauer des Energiespeichersystems schätzen. Im Kontext von Elektrofahrzeugen sind diese zwei Größen im Zusammenhang mit zwei Zeitskalen zu betrachten. Auf einer makroskopischen Zeitskala ist vom Alterungszustand der Batterie und den verbleibenden Ladezyklen die Rede. Wird allerdings über eine mikroskopische Zeitskala gesprochen, so sind der Batterieladezustand und die Restreichweite des Elektrofahrzeugs von Interesse.

Dieser Beitrag präsentiert ein modellgestütztes Prognoseverfahren für Elektrofahrzeuge auf einer mikroskopischen Zeitskala, welches zur Schätzung des Batterieladezustandes und der Restreichweite dient. Das in der **Abbildung 1** dargestellte Verfahren bildet das Elektrofahrzeug und die Batterie anhand von physikalischen Prinzipien mathematisch ab. Der Begriff Schätzung weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass sowohl der Batterieladezustand als auch die Restreichweite des Elektrofahrzeugs keine deterministischen Größen sind, sondern dass sie als stochastisch zu betrachten sind. Eine Reihe von stochastischen Faktoren, wie die mangelnden Kenntnisse über den tatsächlichen Alterungszustand der Batterie oder die Unwissenheit über die zukünftigen Betriebsbedingungen des Fahrzeugs, wie beispielsweise die Verkehrslage entlang der zu fahrenden Strecke, erhöhen die Unsicherheit in der Schätzung.

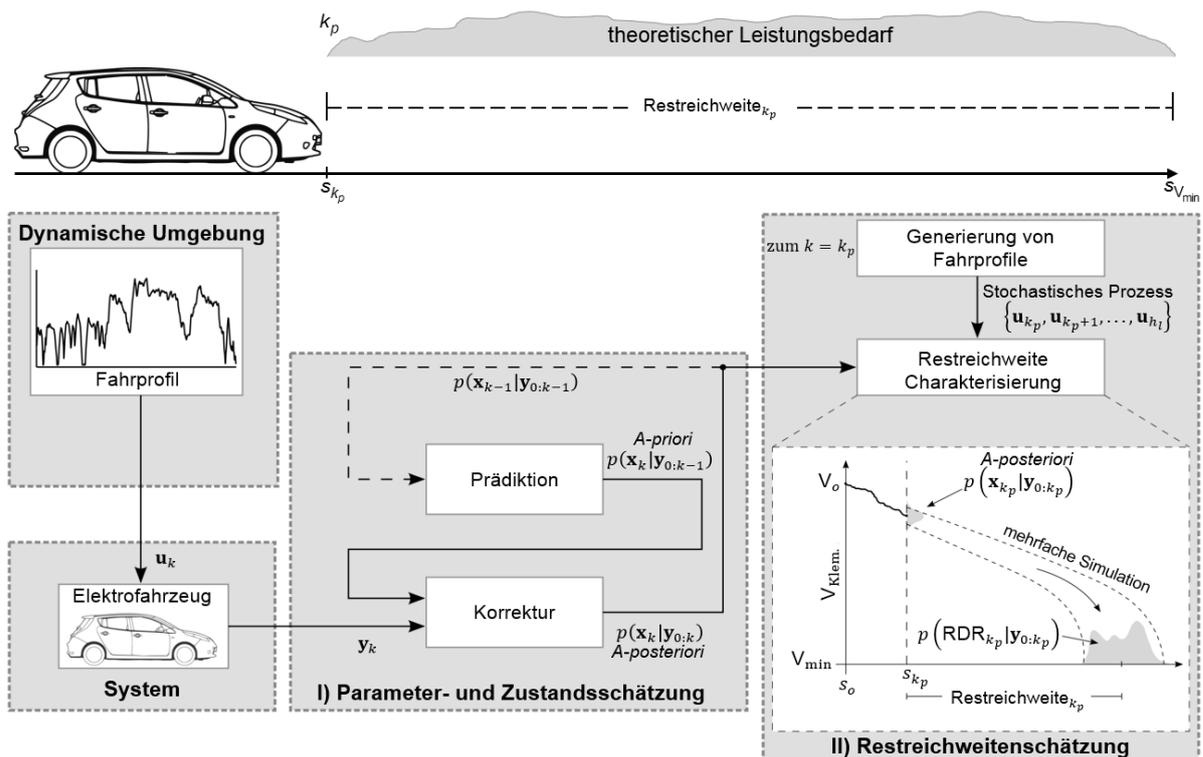


Abbildung 1: Modellgestütztes Prognoseverfahren für Elektrofahrzeuge.

Das Verfahren unterteilt sich in zwei Phasen. In der ersten Phase werden die Parameter und die Zustände, einschließlich des Ladezustandes, eines dynamischen Batteriemodells [1] durch ein stochastisches Verfahren rekursiv geschätzt. Sowohl die Parameter als auch die Zustände werden als Wahrscheinlichkeitsfunktionen dargestellt, welche durch einen Schwarm von Partikeln angenähert werden. In der zweiten Phase erfolgt die Vorhersage bzw. die Schätzung der Restreichweite des Elektrofahrzeugs zu jedem beliebigen Zeitpunkt k_p . Ausgehend von den geschätzten Parametern und Zuständen wird das zeitliche Verhalten der Batterie für jedes Partikel unter der Annahme künftiger Betriebsbedingungen des Elektrofahrzeugs mehrfach so lange simuliert, bis ein definierter Schwellwert erreicht ist. Die dazu gehörige binäre Schwellwertfunktion ist von der minimal zulässigen Batterieklemmenspannung abhängig, da das Batteriemanagementsystem in der Regel das Elektrofahrzeug ausschaltet, wenn diese Spannung erreicht wird, um die Batteriezellen vor einer möglichen Ladungsverarmung zu schützen. Die statistische Charakterisierung der Restreichweite ergibt sich dann aus der Verteilung der Restreichweite der einzelnen Partikel. Die angenommenen künftigen Betriebsbedingungen der Batterie werden aus dem theoretischen Leistungsbedarf des Elektrofahrzeugs entlang synthetischer Fahrprofile, welche anhand der Theorie von stochastischen Prozessen generiert werden [2], berechnet.

Literatur:

[1] Weihsrauch, C., Oliva, J. und Bertram, T.: Modellierung einer Li-Ionen Batterie für die Anwendung in Fahrerassistenzsystemen für Elektrofahrzeuge, AUTOREG, VDI-Verlag (VDI-Berichte, 2013), Baden-Baden (2013).

[2] Oliva, J. und Bertram, T.: Adaptive Driving Situation Characterization for Predicting the Driving Load of Electric Vehicles in Uncertain Environments, European Conference of The Prognostics and Health Management Society, (2013).

Zum flachheitsbasierten Steuerungsentwurf für quasilineare verteiltparametrische Systeme

Torsten Knüppel

Frank Woittennek

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Tel.: 0351 / 463-33268
Fax.: 0351 / 463-37281

torsten.knueppel@tu-dresden.de, frank.woittennek@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Flachheitsbasierter Steuerungsentwurf, verteiltparametrische Systeme

Im Vortrag wird der flachheitsbasierte Entwurf von Steuerungen für eine gewisse Klasse nichtlinearer verteiltparametrischer Systeme diskutiert. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass die zugrundeliegenden partiellen Differentialgleichungen quasilinear und hyperbolisch sind. Derartige Gleichungen treten insbesondere bei der Modellierung von Wellenausbreitungs- und Transportvorgängen mit endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf, die in zahlreichen praktischen Anwendungen eine Rolle spielen. Dazu zählen Strömungsvorgänge in offenen Kanälen [1] und Tanks [2], chemische Rohrreaktoren [3] und flexible mechanische Systeme. Zur letzten Kategorie zählt das im Vortrag zur Erläuterung der grundlegenden Ideen des flachheitsbasierten Steuerungsentwurfs herangezogene Modell eines schweren Seils. Ziel dieses Entwurfsprozesses ist die Realisierung einer Überführung zwischen zwei Ruhelagen.

Aus mathematischer Sicht ist es für den Entwurf einer Steuerung notwendig, die Lösung eines Anfangs-Randwertproblems zu berechnen. Dies stellt im Allgemeinen, insbesondere aber für verteiltparametrische Systeme, eine nichttriviale Aufgabe dar, die in der Regel fortgeschrittene numerische Methoden erfordert.

Durch Übertragung der Grundidee des aus der Theorie konzentriertparametrischer Systeme bekannten Konzepts der Flachheit, die darin besteht sämtliche Systemgrößen durch einen *flachen Ausgang* zu parametrieren, lässt sich der Steuerungsentwurf wesentlich vereinfachen. Dabei wird ausgenutzt, dass sich das Anfangs-Randwertproblem für das untersuchte Modell auf ein Cauchy-Problem, d. h. ein Anfangswertproblem bezüglich des Ortes, zurückführen lässt. Für derartige Cauchy-Probleme steht mit der *Methode der Charakteristiken* [4] ein mächtiges Werkzeug nicht nur zur Berechnung der Lösung sondern auch zur Analyse derer Eigenschaften zur Verfügung. Der letzte Aspekt spielt insbesondere bei der im Rahmen des Steuerungsentwurfs notwendigen Planung von Trajektorien für den flachen Ausgang eine große Rolle.

Zum Vergleich und zur Illustration der Leistungsfähigkeit der so entworfenen Steuerungen werden existierende flachheitsbasierte Zugänge herangezogen, die auf endlichdimensionalen [5] bzw. linearen Approximationen [6] der Modellgleichungen basieren.

Literatur:

- [1] Knüppel, T., F. Woittennek und J. Rudolph: Flatness-based trajectory planning for the shallow water equations. Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control, 2960 – 2965, 2010.
- [2] Petit, N. und P. Rouchon: Dynamics and Solutions to Some Control Problems for Water-Tank Systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 47(4), 594 – 609, 2002.
- [3] Knüppel, T., J. Rudolph und F. Woittennek: Flachheitsbasierte Trajektorienplanung für semilineare hyperbolische Systeme mit Randeingriff. at – Automatisierungstechnik, 58(3), 2010.
- [4] Courant, R. und D. Hilbert: Methoden der mathematischen Physik II, Bd. 31 d. Reihe Heidelberger Taschenbücher. Springer-Verlag, 2. Aufl., 1968.
- [5] Murray, R.M.: Trajectory generation for a towed cable system using differential flatness. Proceedings of the 13th IFAC World congress, 1996.
- [6] Petit, N. und P. Rouchon: Flatness of heavy chain systems. SIAM Journal on Control and Optimization, 40(2):475 – 495, 2001.

Experiments in time-optimal driving

Robin Verschueren *

* Lehrstuhl Systemtheorie, IMTEK
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Georges-Koehler-Allee 102
+49-761-203-64850
robin.verschueren@imtek.uni-freiburg.de

Prof. Dr. Moritz Diehl **

** Lehrstuhl Systemtheorie, IMTEK
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Georges-Koehler-Allee 102
+49-761-203-67852
moritz.diehl@imtek.uni-freiburg.de

Keywords: Nonlinear MPC, Autonomous control of ground vehicles

In the past few years, vehicles that drive (semi-)autonomously, based on conventional control schemes, have been introduced in commercial passenger vehicles. While these systems work rather well in their typical use case, challenging situations may require more sophisticated control algorithms, such as model-predictive control (MPC) [1]. Particularly for the task of fully autonomous driving (nonlinear) MPC permits the use of first-principle models that accurately predict the driving behavior even in extreme conditions.

In order to test nonlinear MPC for autonomous driving or the even more challenging task of time-optimal driving, a real-life setup with miniature race cars has been built in cooperation with Siemens PLM Software (Leuven, Belgium). Using an overhead camera, we can estimate the vehicle state at a rate of 100 Hz. The appropriate control action

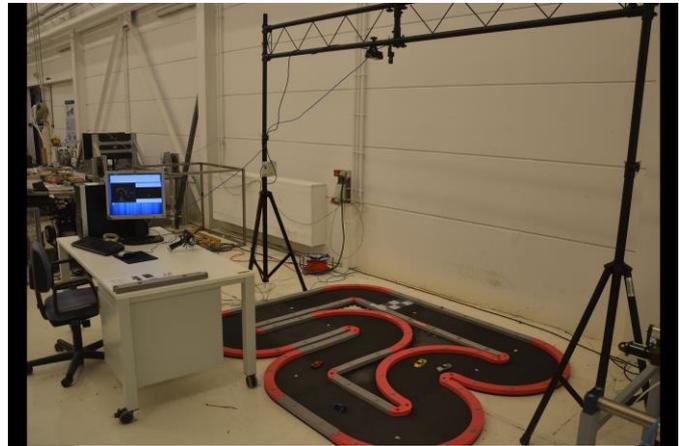


Figure 1. The experimental setup

is calculated in real-time, using nonlinear model predictive control. The vehicle model, presented in [2], is a single-track vehicle model without slip. The time-optimal MPC is solved using the Real Time Iteration (RTI) scheme (cf. [3]), implemented in the ACADO toolbox [4]. The resulting trajectories are quite close to offline computed solutions.

Current research comprises performance comparison between different solvers for the underlying subproblems, as well as improvement of the real-time estimation methods.

Literature:

- [1] J. Rawlings en D. Mayne, Model Predictive Control: Theory and Applications, Nob Hill Publishing, 2009.
- [2] R. Verschueren, S. De Bruyne, M. Zanon, J. Frasch en M. Diehl, Towards Time-Optimal Race Car Driving using Nonlinear MPC in Real-Time, IEEE 53rd CDC conference on Decision and Control, 2014.
- [3] M. Diehl, H. G. Bock, J. P. Schlöder, R. Findeisen, Z. Nagy en F. Allgöwer, Real-time optimization and Nonlinear Model Predictive Control of Processes governed by differential-algebraic equations, Journal of Process Control, 2002.
- [4] „ACADO toolkit” 2009-2014. [Online]. Available: <http://www.acadotoolkit.org>.

Adaptive stabilizer for unknown nonlinear dynamic MIMO system using a cognitive-based framework

Xi Nowak *

Dirk Söffker **

* Steuerung, Regelung und Systemdynamik
Universität Duisburg-Essen
Lotharstr. 1, 47057, Duisburg
Telefon: 02033791914
Fax: 02033793027
E-Mail: xi.nowak@uni-due.de

** Steuerung, Regelung und Systemdynamik
Universität Duisburg-Essen
Lotharstr. 1, 47057, Duisburg
Telefon: 02033793429
Fax: 02033793027
E-Mail: soeffker@uni-due.de

Schlüsselwörter: stabilizer, adaptive, unknown nonlinear, MIMO

This contribution considers the cognitive stabilizer [1], which is an adaptive stabilization control method based on a cognition-based framework to realize flexible and robust control for stabilizing unknown nonlinear MIMO systems with high autonomy. It is assumed, that the model of the nonlinear MIMO system to be controlled is unknown, the state vector can be measured, the system is fully controllable, and the equilibrium points are known.

The framework of the cognitive stabilizer consists of three main modules: (1) online identification and multi-step-ahead prediction of unknown nonlinear MIMO system dynamic, which can be realized using dynamic recurrent neural network or Gaussian process, (2) real time stability judging criterion, e.g. the data-driven quadratic stability criterion [2] or quadratic Lyapunov stability criterion, (3) and suitable control strategies with respect to a cost function defined according to the system energy. The whole framework is realized by automatic interconnection of each module using one of the possible methods for it.

The proposed cognitive stabilizer algorithm is able to stabilize an unknown nonlinear MIMO system at arbitrary equilibrium point. Suitable control inputs are designed automatically to guarantee the stability of motion of the system during the whole process although in case of the changing of the system behavior or the environment. Some numerical examples (Lorenz system) and experiments (Three-Tank-System) are shown to demonstrate the successful application and performance of this method.

Related literature of the authors:

[1] **Shen, X.; Söffker, D.:** *A model-free stability-based adaptive control method for unknown nonlinear systems.* Joint Conference MOVIC and ASME DSCC (Dynamic Systems and Control Conference), Ft. Lauderdale, FL, USA, October 17-19, 2012.

[2] **Zhang, F.; Söffker, D.:** *A data-driven quadratic stability condition and its application for stabilizing unknown nonlinear systems.* Nonlinear Dynamics, Springer Netherlands, 2014, pp. 1-13.

Kombinierte Radschlupf- und Momentenregelung für ein hybrides Bremssystem

Clemens Satzger *

*Institut für Systemdynamik und
Regelungstechnik

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
(DLR)

Münchner Straße 20, 82234 Wessling

Tel.: 08153/28-3226

Fax: 08153/28-1441

E-Mail: Clemens.Satzger@dlr.de

Johann Bals **

** Institut für Systemdynamik und
Regelungstechnik

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
(DLR)

Münchner Straße 20, 82234 Wessling

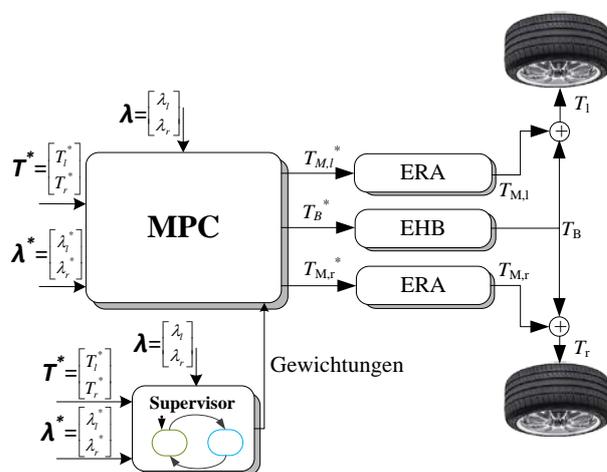
Tel.: 08153/28-2433

Fax: 08153/28-1441

E-Mail: Johann.Bals@dlr.de

Schlüsselwörter: Radschlupfregelung, Modellprädiktive Regelung, Hybrides Bremsen

Die Elektrifizierung des PKW-Antriebsstranges eröffnet neue Möglichkeiten sowohl für die Energie-Rekuperation beim Bremsen als auch bei der Radschlupfregelung. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird hier eine Achse mit hybridem Bremssystem betrachtet, wobei ein elektrohydraulisches Bremssystem (EHB) gleiche Radbremsdrücke an beiden Rädern und damit etwa symmetrische Reibbremsmomente T_B erzeugt. Darüber hinaus ist jedem Rad ein elektrischer Einzelradantrieb (ERA) mit den Momenten $T_{M,l}$, $T_{M,r}$ zugeordnet. Hiermit stehen beim Bremsen für zwei Räder drei Aktuatoren zur Verfügung, von denen einer nur Momente entgegen der Raddrehung mit vergleichsweise niedriger Bandbreite und hohem Betrag ausüben kann. Durch die höhere Bandbreite der elektrischen Maschinen gegenüber hydraulischen Bremssystemen kann insgesamt eine verbesserte Radschlupfregelung realisiert werden. Die Ausnutzung dieser asymmetrischen Redundanz bietet Spielraum für Optimierungen der regelungstechnischen Ansteuerung. Regelungsziele sind ein stabiles und hochwirksames Bremsverhalten sowie eine möglichst hohe Energierückgewinnung.



Grundsätzlich gibt es zwei Betriebsfälle bei der Bremsung. Im Normalbetrieb wird auf Sollradbremsmomente T_l^* bzw. T_r^* geregelt. Bei Überschreitung des Kraftschlusspotentials zwischen Reifen und Straße ist es dagegen zweckmäßig, auf eine Radschlupfregelung umzuschalten [2].

In der Literatur ist die Anwendung verschiedener Regelungsansätze auf das Problem der Radschlupfregelung zu finden. Diese reichen von linearen Reglern [3] über nichtlineare Regler, wie etwa Sliding Mode Control [4], bis hin zu modellprädiktiver Regelung (MPC) [5], [6]. Jedoch sind keine integrierten Regelungsansätze bekannt, welche die Radschlupfregelung mit der Bremsmomentenaufteilung bei redundanter Bremsaktuatorik vereinen.

Abbildung 1: Vereinheitlichte Radschlupfregelung angewandt am Antriebsstrang des ROMO [1]

In diesem Beitrag wird hierzu ein zeitdiskreter, modellprädiktiver Lösungsansatz unter Berücksichtigung von Stellgrößenbeschränkungen vorgeschlagen. Da im Arbeitspunkt ein linearisiertes Modell der Strecke verwendet wird, ist eine echtzeitfähige Lösung des zugeordneten Optimierungsproblems möglich. Gemäß Abbildung 1 werden die Referenzradmomente T^* (z.B. aus einer übergeordneten Fahrdynamikregelung, [1]) auf die

redundante Aktuatorik der Achse aufgeteilt. Ein Zustandsautomat („Supervisor“) kommandiert radindividuell die Umschaltung zwischen Normalbetrieb (Momentenregelung) und Radschlupfregelung. Diese Umschaltung wird über eine Änderung der Gewichtungen im MPC-Gütefunktional erreicht [7]. Im Falle der Radschlupfregelung wird auf denjenigen Sollschlupf λ^* geregelt, bei dem das Maximum der Reifenlängskraft vermutet wird.

Der Lösungsansatz erlaubt sowohl die Integration mehrerer Ziele in ein Gütefunktional als auch die Berücksichtigung der jeweiligen Aktuatordynamik und -beschränkung [8]. Beispielsweise ist es möglich und zweckdienlich, im Gütefunktional die Höhe der rekuperierten Bremsenergie zu berücksichtigen. Durch die Formulierung entsprechender Nebenbedingungen kann der Regelungsansatz auf praktisch jede Fahrzeugkonfiguration mit redundanter Bremsaktuatorik sowie für Online-Rekonfiguration der Regelung im Fehlerfall angewandt werden.

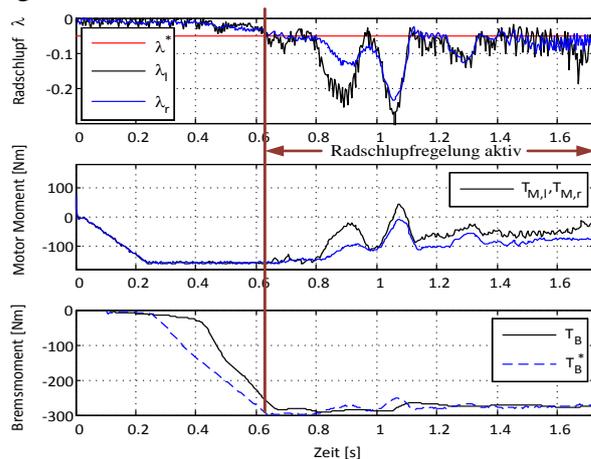


Abbildung 2: Messergebnisse einer μ -split-Bremmung der ROMO-Hinterachse

Abbildung 3: Das ROMO beim Bremsenversuch

Die Signalverläufe bei einer im Fahrversuch mit unserem Forschungsfahrzeug ROMO (siehe Abbildung 3 und [9]) aufgezeichneten Regelbremsung auf einer Fahrbahn mit asymmetrischen Kraftschlussbedingungen („ μ -split“) mit der vorgestellten MPC zeigt Abbildung 2. Bei den hier gewählten Gewichtungen im Gütefunktional mit Schwerpunkt auf Regelgüte liefert die EHB das Basismoment und die beiden ERA sorgen für die Schlupfregelung mit hoher Bandbreite. Dies ist besonders im Falle des Vorliegens einer äußeren Störung erkennbar (bei ca. 0.8s bis 1.1s in Abbildung 2).

Literatur:

- [1] T. Bunte, L. M. Ho, C. Satzger and J. Brembeck, "Central Vehicle Dynamics Control of the Robotic Research Platform ROboMObil," *ATZ elektronik*, vol. 03, 2014.
- [2] S. M. Savaresi and M. Tanelli, *Active Braking Control Systems Design for Vehicles*, Springer Verlag, 2010.
- [3] C. Satzger, R. de Castro and T. Bunte, "A Model Predictive Control Allocation Approach to Hybrid Braking of Electric Vehicles," in *Intelligent Vehicles Symposium*, 2014.
- [4] R. d. Castro, R. E. Araújo, M. Tanelli, S. M. Savaresi and D. Freitas, "Torque blending and wheel slip control in EVs with in-wheel motors," *Vehicle System Dynamics*, vol. 50, pp. 71-94, 2012.
- [5] D. K. Yoo and L. Wang, "Model based wheel slip control via constrained optimal algorithm," in *Conference on Control Applications*, 2007.
- [6] J. Olafsdottir, M. Lidberg and P. Falcone, "Energy Recuperation in Fully Electric Vehicles Subject to Stability and Drivability Requirements," in *11th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Seoul, 2012.
- [7] C. Satzger and R. d. Castro, "Bremsregelverfahren für ein Fahrzeug". Deutschland Patent P 008 0031 DE00, 06 06 2014.
- [8] C. Satzger and R. de Castro, "Combined Wheel-Slip Control and Torque Blending using MPC," in *International Conference on Connected Vehicles & Expo (ICCVE)*, Vienna, 2014.
- [9] J. Brembeck, L. M. Ho, A. Schaub and C. Satzger, "ROMO - The Robotic Electric Vehicle," in *22nd IAVSD*, 2011.

Unified Passivity-Based Cartesian Force/Impedance Control for Rigid and Flexible Joint Robots via Task-Energy Tanks

Christopher Schindlbeck, Sami Haddadin*

Keywords: Impedance control, force control, robotics, energy-tank based stability analysis

Nowadays, robotic systems outperform humans in terms of repetitive speed and precision tasks. In terms of sensitive force and compliance control humans still show superior performance but at the same time an increasing set of tasks in robotic manipulation, and in particular also in real-world applications, deals now with sensitive object handling and assembly. This requires an intricate coordination of contact force and motion generation for which sophisticated control algorithms were developed over the last decades.

In this context, impedance control [1] has become one of the most popular concepts, which aims for mimicking human behavior by imposing mass-spring-damper-like response via active control on the robot. Despite the significant progress that was made some basic problems still remain, such as: an impedance controller executes desired forces either via a pure feed-forward force or through a virtual displacement. Therefore, these controllers do not take into account sensed external forces. Hence, in order to accurately apply desired forces, the surface geometry and the contact properties (stiffness) need to be known a-priori. Furthermore, this paradigm has the drawback that when applying a larger force with such a feed-forward approach and then unexpectedly losing contact with the environment, this may result in an undesired and possibly very unsafe motion of the robot towards the (distant) set-point.

On the other hand, the direct force control paradigm provides the basics to accurately exchange contact forces and thus directly manipulate objects or apply forces on surfaces. This has been extended to approaches such as hybrid position/force control [2], which idea is to partition the task space into complementary force and motion subspaces such that force and motion control is only applied in its respective subspace. However, a major drawback of (hybrid) force control methods is that they show very low robustness with respect to contact loss. Furthermore, the environment contact properties need to be modeled very accurately for good performance, which is hardly ever the case. Furthermore, in order to determine the stability properties of force controllers, the environment is typically modeled as a simple spring-damper system [3]. A very general critique regarding hybrid force/motion control was also formulated in [4] that was based on the problem of coordinate choice and the respective choice of metric. We present a robust passivity-based approach by combining force tracking

*The authors are with the Institute of Automatic Control, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Leibniz Universität Hannover, 30167 Hanover, Germany {schindlbeck,haddadin}@irt.uni-hannover.de

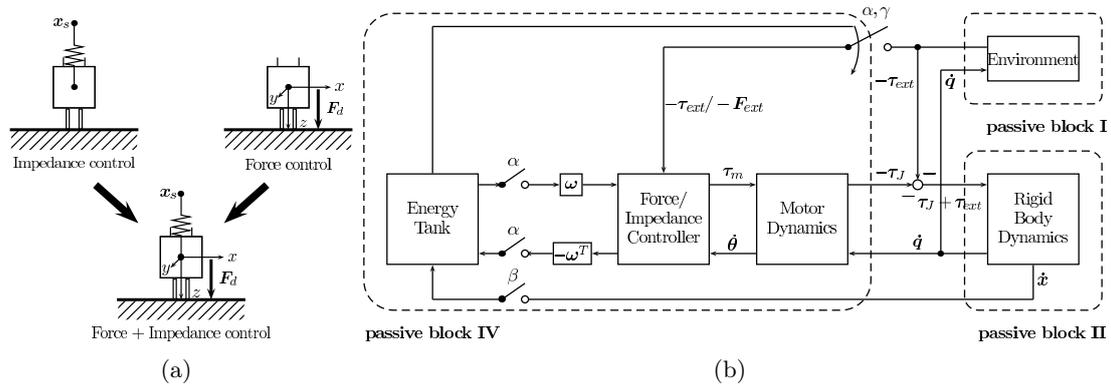


Figure 1: (a) Conceptual schematic of the controller fusion. (b) Port-based view of the controller in terms of in parallel and in feedback interconnected blocks with an additional energy tank.

with impedance control (see Figure 1(a)) based on the concept of energy tanks [5]. The approach guarantees stability for arbitrary passive environments and has no need to apply set-point variations, which show rather inaccurate behavior for general environments. Our solution allows for robust, compliant, and stable manipulations without the need to choose between force or impedance control, but rather unify the best of all. Furthermore, we present a solution that is able to get rid of the inherent drawback of force and set-point based indirect force control: the low robustness with respect to contact loss and the according possibility of unsafe abrupt robot motions. The block diagram for the presented controller is depicted in Figure 1(b).

References

- [1] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation: Part I -theory, part II - implementation, part III - applications," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, pp. 1–24, 1985.
- [2] M. Raibert and J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *ASME Journal of Dynamical Systems, Measurement and Control*, vol. 105, pp. 126–133, 1981.
- [3] G. Zeng and A. Hemami, "An overview of robot force control," *Robotica*, vol. 15, no. 05, pp. 473–482, 1997.
- [4] J. Duffy, "The fallacy of modern hybrid control theory that is based on "orthogonal complements" of twist and wrench spaces," *Journal of Robotic Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 139–144, 1990.
- [5] F. Ferraguti, C. Secchi, and C. Fantuzzi, "A tank-based approach to impedance control with variable stiffness.," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2013 (ICRA2013)*, pp. 4948–4953, 2013.

Analyse und Ordnungsreduktion von Modellen der Glukose-Insulin-Homöostase auf Basis Empirischer Gramscher Matrizen

Christian Tolks *

* Fachgebiet Systemanalyse
Technische Universität Ilmenau
Helmholtzplatz 5, 98693 Ilmenau
03677/ 69-4828
03677/ 69-1434
christian.tolks@tu-ilmenau.de

Christoph Ament **

** Fachgebiet Systemanalyse
Technische Universität Ilmenau
Helmholtzplatz 5, 98693 Ilmenau
03677/ 69-2814
03677/ 69-1434
christoph.ament@tu-ilmenau.de

Schlüsselwörter: Empirische Gramsche Matrizen, Ordnungsreduktion, Glukose-Insulin-Homöostase

Dynamische Modelle von Stoffwechselfvorgängen bieten eine Möglichkeit zum besseren Verständnis von Krankheiten und damit zu einer möglichen Verbesserung von Diagnose- und Therapiemöglichkeiten mit dem Ziel, die Lebensqualität von Patienten zu steigern. Modelle der Glukose-Insulin-Homöostase werden bereits seit Ende der 1960er Jahre entwickelt. Insbesondere das in [6] vorgestellte „Minimal Model“ nach Bergman wird intensiv in klinischer Diabetesforschung und Methodenentwicklung genutzt. Es bildet die Verstoffwechslung von Glukose und Insulin im Organismus als nichtlineares dynamisches Modell ab.

Modelle biologischer Systeme haben i.d.R. sehr viele Zustände und Modellparameter, welche sich nicht oder nur sehr schwer direkt messen lassen. Eine Reduktion der Systemordnung auf eine beherrschbare Anzahl an Zuständen ist daher sinnvoll. Um dennoch adäquates Modellverhalten zu gewährleisten, kann eine Analyse auf Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit der Zustände durchgeführt werden. Weniger dominante Zustände sind vernachlässigbar, da ihr Einfluss auf das Gesamtsystemverhalten gering ist. Für die Modellparameter kann in analoger Weise die Sensitivität und Identifizierbarkeit betrachtet werden, [4]. Hier kann die Reduktion des Parameterraums helfen, die Zahl der patientenspezifisch zu bestimmenden Parameter zu reduzieren, so dass eine effiziente Individualisierung der Modelle möglich wird.

Das Konzept der Gramschen Matrizen erlaubt die Analyse von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit linearer Systeme. Da das betrachtete Stoffwechselmodell aus [2] nichtlinearer Natur ist, bietet sich zur Analyse eine Erweiterung des Konzeptes auf Empirische Gramsche Matrizen an, [3, 5]. Für die Steuerbarkeitsanalyse wird das System hierfür mit verschiedenen Folgen von Eingangssignalen beaufschlagt, für die Beobachtbarkeitsanalyse entsprechend die Initialzustände verändert. Aus dem Vergleich zwischen den so ermittelten Bewegungstrajektorien mit einer Referenztrajektorie lassen sich die Empirischen Gramschen Matrizen berechnen, und man erhält so Auskunft darüber, wie gut die Zustände des Systems steuer- bzw. beobachtbar sind.

Anschließend wird eine Zustandsraumdarstellung gesucht, in der der Energietransfer von den Eingängen in die Zustände bzw. von den Zuständen in die Ausgänge entkoppelt ist. Das System liegt dann in balancierter Darstellung vor und die Gramschen Matrizen sind gleich und besitzen Diagonalgestalt.

Dazu soll die in [1] vorgestellte Gramsche Kreuzmatrix (engl. cross gramian) herangezogen werden, welche mit nur einer Berechnung der Gramschen Matrix auskommt und eine direkte Ordnungsreduktion erlaubt. Zustände mit geringem Gewicht können dann entweder aus der Diagonalmatrix der balancierten Darstellung oder durch direktes abschneiden entfernt werden und führen zu einem Unterraummodell reduzierter Ordnung.

Die Methodik soll an dem in [2] vorgestellten Modell des Glukose-Insulin-Stoffwechselsystems vorgestellt werden. Das reduzierte Modell ermöglicht dann eine einfachere Adaption an die patientenspezifischen Verhältnisse.

Literatur:

- [1] C. Himpe and M. Ohlberger, "Cross-Gramian-Based Combined State and Parameter Reduction for Large-Scale Control Systems," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, no. 2, pp. 1–13, 2014.
- [2] C. Eberle and C. Ament, "Identifiability and online estimation of diagnostic parameters with in the glucose insulin homeostasis," (eng), *Biosystems : Journal of Biological and Information Processing Sciences*, vol. 107, no. 3, pp. 135–141, 2012.
- [3] D. Geffen, R. Findeisen, M. Schliemann, F. Allgower, and M. Guay, "Observability based parameter identifiability for biochemical reaction networks," in *Proceedings of the American Control Conference (ACC '2008)*, pp. 2130–2135, 2008.
- [4] C. Sun and J. Hahn, "Parameter reduction for stable dynamical systems based on Hankel singular values and sensitivity analysis," *Chemical Engineering Science*, vol. 61, no. 16, pp. 5393–5403, 2006.
- [5] S. Lall, J. E. Marsden, and S. Glavaški, "Empirical Model Reduction of Controlled Nonlinear Systems," in *Proceedings of the 14th IFAC World Congress*, pp. 473–478, 1999.
- [6] R. N. Bergman, Y. Z. Ider, C. R. Bowden, and C. Cobelli, "Quantitative estimation of insulin sensitivity," *Am. J. Physiol.-Endocrinol. Metab*, vol. 236, no. 6, pp. 667–677, 1979.

Entwurf einer flachheitsbasierten Steuerung für kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke

Dipl.-Ing. Lutz Hanel*

Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht**

*Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)

Abteilung Stromerzeugung und Automatisierungstechnik (SuA)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 23
Telefon: 0711 685-66208
Fax: 0711 685-63491
lutz.hanel@ifk.uni-stuttgart.de

**Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 23
Telefon: 0711 685-63487
Fax: 0711 685-63491

guenter.scheffknecht@ifk.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke, Blockführung, flachheitsbasierte Steuerung

Die Umstrukturierungen im Energiesektor im Rahmen der Energiewende haben weitreichende Konsequenzen für konventionelle Kraftwerke. Die zunehmende intermittierende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und deren garantierter Einspeisevorrang sorgen zum einen für eine geringere Auslastung, zum anderen müssen witterungsabhängige Erzeugungsschwankungen der erneuerbaren Energien ausgeglichen werden [1]. Dadurch muss der Betrieb konventioneller Kraftwerksanlagen, entgegen der Auslegung zur Deckung der Grundlast, in Zukunft deutlich flexibler erfolgen als bisher [2,3]. Ein wichtiger Aspekt des flexiblen Betriebs sind häufigere und schnellere Lastwechsel. Hierzu gehören sowohl fahrplanmäßige Laständerungen als auch die Bereitstellung von sogenannter Regelleistung.

Diesen Herausforderungen kann durch vielfältige Modernisierungsmaßnahmen begegnet werden [2,3]. Ein wichtiger Ansatz auf leitetchnischer Ebene ist der Einsatz moderner Steuer- und Regelkonzepte. Für kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke (Kombikraftwerke) wurde dies in [4] untersucht.

Kombikraftwerke bestehen in ihrer einfachsten Form aus einer Gasturbine sowie einem Abhitzeessel. Im Abhitzeessel werden die heißen Abgase der Gasturbine genutzt, um Dampf zu erzeugen, der schließlich über eine Dampfturbine entspannt wird. Dadurch können höhere Wirkungsgrade erzielt werden als beispielsweise in Kohlekraftwerken. Die Gesamtleistung des Kraftwerks ist somit die Summe aus Gas- und Dampfturbinenleistung, wobei die

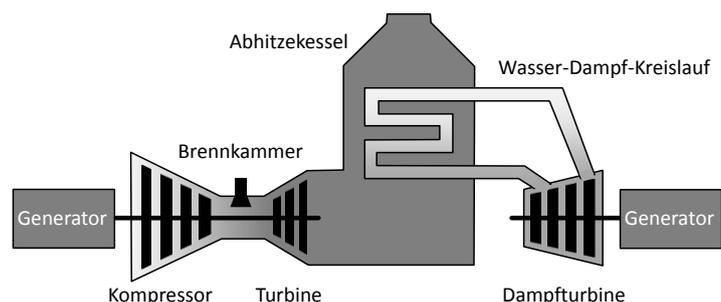


Abbildung 1: Grundlegender Aufbau kombinierter Gas- und Dampfkraftwerke

Leistung der Dampfturbine der Leistung der Gasturbine, in Abhängigkeit des zur Verfügung gestellten Abhitzestroms, unregelt folgt.

Im hierarchisch aufgebauten Regelkonzept von Kombikraftwerken kommt auf der obersten Ebene, der sogenannten Blockführung, eine reine Regelung zum Einsatz. Damit wurde bisherigen Ansprüchen genügt, da das Hauptaugenmerk auf der Ausregelung von Störungen lag. Aufgrund der wachsenden Anforderungen an das Last-

wechselerhalten liegt jedoch eine Erweiterung des Blockführungskonzeptes auf der Hand. In [4] wurde ein zusätzlicher Steuerzweig vorgeschlagen, in dem eine flachheitsbasierte Steuerung [5,6] zum Einsatz kommt. Diese hat im Wesentlichen die Aufgabe, Gas- und Dampfturbinenleistung so aufeinander abzustimmen, dass die gewünschte Gesamtleistung erreicht wird.

In diesem Beitrag werden neben der Verbesserung des Leistungsregelverhaltens zwei weitere positive Aspekte des erweiterten Blockführungskonzeptes vorgestellt: Zum einen werden durch die verbesserte Abstimmung von Gas- und Dampfturbine ruhigere Stellgrößenverläufe erzielt was sich vorteilhaft auf den Stellaufwand auswirkt. Zum anderen wird auch das Regelverhalten unterlagerter Regelkreise verbessert. Diese Aspekte werden anhand von Simulationen mit einem komplexeren, nicht-linearen Simulationsmodell [7,8] gezeigt. Dadurch können auch Auswirkungen auf Temperaturschwankungen untersucht werden, was hinsichtlich der Lebensdauer kritischer Bauteile im Abhitzeessel von besonderer Bedeutung ist.

Literatur:

- [1] International Energy Agency: *World Energy Outlook 2012*, IEA Publications, Paris, 2012
- [2] Kahlert, J.; Schüle, V.; Altmann, H.: *Möglichkeiten und Grenzen zur Optimierung betrieblicher Flexibilität in existierenden Kraftwerken*, VGB PowerTech 1/2 2013, 2013
- [3] Tigges, K.-D.: *Modernisierung von Bestandskraftwerken – Wesentlicher Beitrag für eine zuverlässige Stromversorgung*, VDI Fachtagung Flexibilitäts- und Effizienzsteigerung von Bestandskraftwerken, Stuttgart, 2013
- [4] Hanel, L.; Gutekunst, F.; Scheffknecht, G.: *Improved Load Tracking Performance for Combined Cycle Gas Turbine Plants through Flatness Based Feedforward Control*, IFAC World Congress 2014, Kapstadt, 2014
- [5] Fliess, M. et al.: *Flatness and defect of non-linear systems: Introductory theory and examples*, International Journal of Control, 61, 2012
- [6] Zeitz, M.: *Differentielle Flachheit: Eine nützliche Methodik auch für lineare SISO-Systeme*, Automatisierungstechnik 1/2010, 2010
- [7] Hanel, L; Gutekunst, F. Scheffknecht, G.: *Flexibilisierung des Betriebs von GuD-Anlagen durch flachheitsbasierte Steuerung*, 49. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden, 2014
- [8] Rowen, W.: *Simplified Mathematical Representations of Heavy-Duty Gas Turbines*, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 105, 1983

Modellbasierte Identifikation fraktionaler Systeme

Marius Eckert *

Sören Hohmann **

* Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Wilhelm-Jordan-Weg 1, 76131 Karlsruhe
Telefon: 0721 608-43179
Fax: 0721 608-42707
mariaus.eckert@kit.edu

** Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Wilhelm-Jordan-Weg 1, 76131 Karlsruhe
Telefon: 0721 608-43180
Fax: 0721 608-42707
soeren.hohmann@kit.edu

Schlüsselwörter: modellbasiert Identifikation, fraktionale Systeme, Li-Ionen Batterie, Alterung

Consumer Produkte mit elektrischem Energiespeicher wie Handys, Laptops oder Werkzeugmaschinen sind heutzutage aus dem Alltag nicht mehr weg zu denken. Im Zuge der Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen ist die Batterie darüber hinaus eine Schlüsselkomponente im Antriebsstrang eines Elektrofahrzeugs. Insbesondere in letzterem Fall ist es erforderlich, dass ein Batteriemanagementsystem (BMS) neben sicherheitsrelevanten Funktionen auch für eine optimale Ausnutzung und eine lange Lebensdauer der Batterie sorgt. Für die Alterungsbestimmung operieren aktuelle BMS mit phänomenologisch motivierten Alterungsparametern, die aufgrund der Streuung bei der Batteriezellherstellung ungenaue Ergebnisse liefern. Günstiger erscheinen Modelle, deren Parameter physikalisch interpretierbar sind [1]. Materialwissenschaftler nutzen zur Erstellung derartiger Modelle seit jeher nicht-parametrische Frequenzbereichsmethoden wie die elektrische Impedanzspektroskopie (EIS). Anschließend erfolgt eine Nachbereitung mit der Methode der Distribution of Relaxation Times (DRT), die dann eine physikalische Interpretation erlaubt [1]. Sowohl aufgrund der langen Messzeiten als auch aufgrund „manueller“ Zwischenschritte bei der Bestimmung der DRT eignen sich diese Methoden jedoch vornehmlich für den Laborbereich [2,3].

In diesem Vortrag wird hingegen ein parametrisches Zeitbereichsverfahren zur modellbasierten Parameteridentifikation vorgestellt, das im Gegensatz zu gängigen Methoden [4] ein fraktionales Impedanzmodell verwendet [1,5]. Aufgrund der fraktionalen Beschreibung lässt das Modell einerseits Rückschlüsse auf physikalisch motivierte Alterungsparameter zu und erscheint andererseits besser geeignet für eine automatisierte Bestimmung der Alterung z.B. in einem Elektrofahrzeug.

Die Grundidee des Verfahrens ist, die im Modell auftretenden fraktionalen Ableitungen der Messgrößen auf eine geeignet zu wählende Modulationsfunktion zu übertragen. Für gewöhnliche Systeme mit ganzzahligen Ableitungen wurde eine derartige Methode bereits in [6] formuliert und wird in diesem Beitrag auf fraktionale Systeme übertragen. Vorteilhaft ist, dass die sonst übliche, frühe Approximation des fraktionalen Ableitungsoperators entfällt [7] und physikalisch motivierte Alterungsparameter modellbasiert identifiziert werden können. Anhand von Simulationen konnte gezeigt werden, dass das Verfahren weniger empfindlich gegenüber Rauschen ist, als bestehende Methoden.

Als problematisch erweist sich allerdings, dass die Modulationsfunktionen bisher ausschließlich heuristisch gewählt werden. Diese Wahl ist aufwendig und vor allem nicht immer optimal. Abhilfe schafft hier ein systematischer Ansatz, mit welchem sich die optimalen Modulationsfunktionen modellbasiert bestimmen lassen. Die Vorgehensweise ist grundsätzlich inspiriert durch [8] muss für fraktionale Systeme allerdings signifikant erweitert werden. Der Ansatz basiert auf einem zeitvarianten Hilfssystem, welches aus der Identifikationsgleichung resultiert und sowohl fraktionaler als auch gewöhnlicher Natur ist. Es lässt sich dabei zeigen, dass die steuerenergieoptimale Überführung dieses Systems in den Ursprung zu der gesuchten Modulationsfunktion führt.

Die optimale Steuerung berechnet sich mit Hilfe des Hamilton Formalismus, welcher auch für fraktionale Systeme existiert [9]. Geschlossene Lösungen konnten bisher jedoch nur für zeitinvariante Systeme angegeben werden [10]. Im diesem Beitrag wird eine geschlossene Lösung eines zeitvarianten fraktionalen Systems präsentiert, mit dessen Hilfe dann die gesuchte Optimalsteuerung für das zeitvariante Hilfsmodell bestimmt werden kann. Ein Beispiel zeigt die Wirksamkeit im Kontext der Batteriealterungsbestimmung.

Literatur:

- [1] Schichlein, H; Müller, A.; Voigts, M.; Krügel, A.; Ivers-Tiffée, E.: Deconvolution of electrochemical impedance spectra for the identification of electrode reaction mechanism in solid oxide fuel cells, *Journal of Applied Electrochemistry*, 2002, 875-882
- [2] Orazem, M. E.: *Electrical Impedance Spectroscopy*, John Wiley & Sons, 2011
- [3] Macdonald, J. R.: *Impedance Spectroscopy*, John Wiley & a Sons, 1987
- [4] Prasad, G.K.; Rahn, C. D.: Model based identification of aging parameters in lithium ion batteries, 2013, *Journal of Power Sources* 232, 79-85
- [5] Haschka, M.; Krebs, V.: A Direct Approximation of Fractional Cole-Cole Systems by Ordinary First-Order Process, *Advances in Fractional Calculus: Theoretical Developments and Applications*, 2007, 257-270
- [6] Shinbrot, M.: On the Analysis of Linear and Nonlinear Dynamical Systems from Transient-response Data, *Technical Note. NACA*, 1954
- [7] Podlubny, I.: *Matrix Approach to Discrete Fractional Calculus*, *Fractional Calculus & Applied Science*, 2000, 3, 359-386
- [8] Schmid, C.; Roppenecker, G.: Parameteridentifikation für LTI-Systeme mit Hilfe signalmodellgenerierter Modulationsfunktionen, *at-Automatisierungstechnik*, 2011, 521-527
- [9] Agrawal, O. P.: A Hamilton Formulation and a Direct Numerical Scheme for Fractional Optimal Control Problems, *Journal of Vibration and Control*, 2007, 13, 1269-1281
- [10] Das, S.: Gramian for Control of Fractional Order Multivariate Dynamic Systems, *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 2013, 37, 71-96

Bag of Visual Words für die automatische Schüttgutsortierung

Matthias Richter ¹

Jürgen Beyerer ^{1,2}

¹ Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Adenauerring 4, 76131 Karlsruhe
Telefon: +49 (0) 721 6091-389
matthias.richter@kit.edu

² Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik
und Bildauswertung IOSB
Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe
Telefon: +49 (0) 721 6091-210
juergen.beyerer@iosb.fraunhofer.de

Schlüsselwörter: Automatische Sichtprüfung; Mustererkennung; Feature Learning

In gegenwärtigen Schüttgutsortiersystemen kommen vor allem einfache Merkmale (Farbe, Textur, Form) und Klassifikationsalgorithmen (Entscheidungsbäume, Support Vektor Maschinen, ...) zum Einsatz [1]. Sind einfache Merkmale nicht ausreichend, werden spezifisch an das Problem angepasste Verfahren zur Merkmalsextraktion konstruiert [2]. Dabei ist die Grundüberlegung, dass die verwendeten Merkmale einen wesentlich größeren Einfluss auf die Sortierleistung haben als der eigentliche Klassifikator; nur wenn die Klassen im Merkmalsraum separierbar sind, kann der Lernalgorithmus gute Entscheidungsgrenzen finden.

Der Nachteil an diesem Vorgehen ist, dass die Auswahl bzw. Konstruktion geeigneter Merkmale viel Zeit erfordert und somit Arbeitskräfte bindet, die anderorts ebenfalls gebraucht werden. Zudem ist Endanwendern ohne Kenntnisse der Bildverarbeitung und Mustererkennung die korrekte Inbetriebnahme und Instandhaltung der Sortiersysteme oft unmöglich. Ändern sich die Sortieranforderungen, ist der erneute Einsatz eines Experten erforderlich.

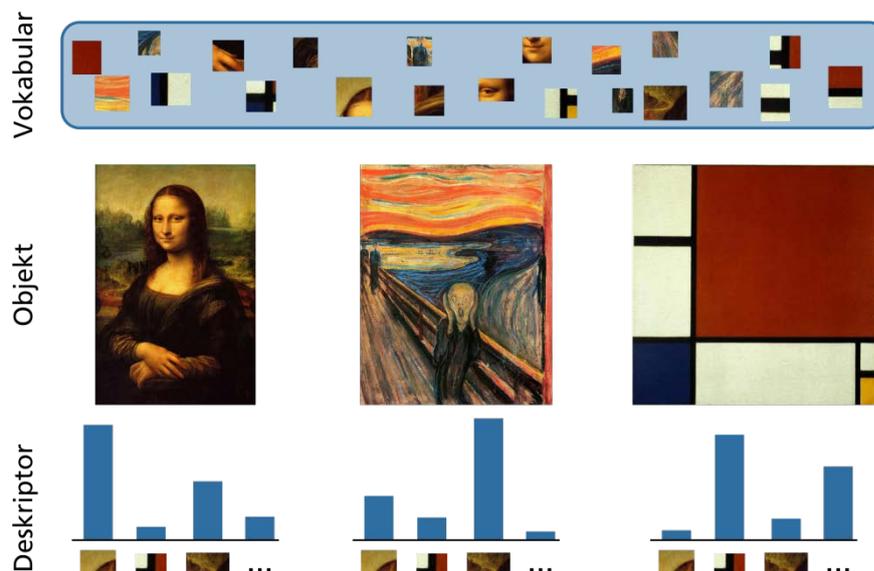


Abbildung 1: Bag of Visual Words beschreibt Objekte als Zusammensetzung visueller Wörter.

Um dem entgegenzuwirken, fassen wir in diesem Beitrag das aus der Objektkategorisierung bekannte Verfahren *Bag of Visual Words* [3] auf, welches Objekte als Zu-

sammensetzung visueller Wörter beschreibt (vgl. Abb. 1). Das Vokabular visueller Wörter wird auf Grundlage von Low-Level Deskriptoren aus einer Stichprobe von Beispielobjekten gelernt. In der Objektkategorisierung kommen hierfür oft SIFT-Features zum Einsatz. Für die Schüttgutsortierung ist dieser Ansatz allerdings ungeeignet, da die zu sortierenden Objekte relativ klein sind und nur sehr wenig Zeit zur Merkmalsberechnung zur Verfügung steht. Stattdessen verwenden wir sehr einfache lokale Deskriptoren, die für jeden Vordergrundpixel des Objekts extrahiert werden.

Der resultierende Ansatz ist fast parameterfrei und erfordert lediglich eine annotierte Lernstichprobe, die vom Endanwender bereitgestellt wird. Die resultierenden Deskriptoren kodieren die Farbzusammensetzung und weitere lokale Eigenschaften der Objekte und sind von Laien interpretierbar. Zudem lässt sich die Merkmalstransformation sehr effizient durch Rückprojektion implementieren. Somit ist das Verfahren ideal für den Einsatz in der Schüttgutsortierung geeignet.

Literatur:

- [1] C.-J. Du and D.-W. Sun, "Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review," *Journal of Food Engineering*, vol. 72, no. 1, pp. 39–55, Jan 2006.
- [2] C. Li, Q. Cao, and F. Guo. "A method for color classification of fruits based on machine vision". *WSEAS Transactions on Systems*, 8(2):312–321, Feb 2009.
- [3] G. Csurka, C. Dance, L. Fan, J. Willamowski, and C. Bray. "Visual categorization with bags of keypoints." *International Workshop on Statistical Learning in Computer Vision (ECCV)*, pp. 1–22, 2004.

Synchrone und asynchrone hierarchische Regelung verkoppelter Systeme

Martin Jilg *

* Regelungs- und Systemtheorie
 Universität Kassel
 Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel
 Tel.: 0561 – 804 6494
 Fax: 0561 – 804 6383
 martin.jilg@uni-kassel.de

Olaf Stursberg **

** Regelungs- und Systemtheorie
 Universität Kassel
 Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel
 Tel.: 0561 – 804 6367
 Fax: 0561 – 804 6383
 stursberg@uni-kassel.de

Schlüsselwörter: Hierarchische Regelung, verkoppelte Systeme, Systemdekomposition

Aktuelle Regelungsansätze für verkoppelte Teilsysteme sind überwiegend verteilt, d.h. lokale Regler tauschen Informationen über ein Kommunikationsnetzwerk aus. Eine vollständige Kommunikation zwischen allen Teilsystemen soll dabei in der Regel vermieden werden, um die Implementierung zu erleichtern und übermäßigen Kommunikationsaufwand zu vermeiden. Eine spezielle Klasse von verteilten Regelungsansätzen für verkoppelte Teilsysteme betrachtet eine gemeinsame Optimierung der Reglerperformanz und der Topologie des Kommunikationsnetzes, die letztendlich zu einem Kompromiss zwischen Kommunikationsaufwand und Optimalität führt [1],[2],[3],[4].

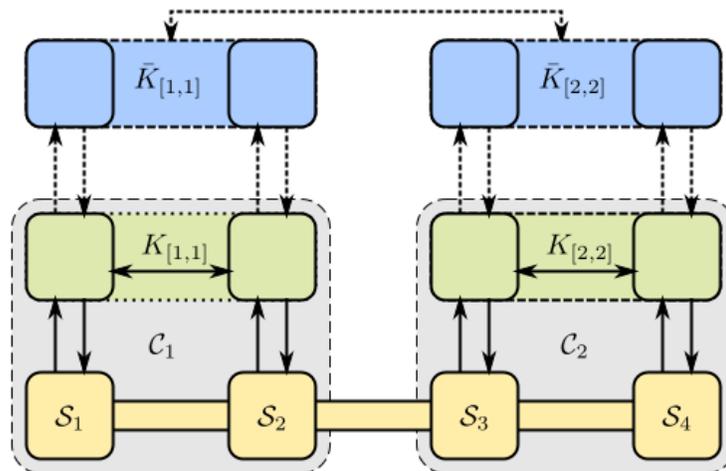


Abbildung 1: Hierarchische Reglerstruktur

Ein Nachteil dieser Ansätze ist ihr hoher Rechenaufwand, welcher durch die binären Entscheidungen über die Aktivierung der Kommunikationsverbindungen im Optimierungsproblem begründet ist. Vor kurzem haben die Autoren dieses Beitrags einen neuartigen Ansatz entwickelt [5], um die Anzahl der binären Entscheidungsvariablen in dieser Problemklasse mit Hilfe einer vorgeschalteten Systemdekomposition in Anlehnung an [6] und einer verteilten hierarchischen Reglerstruktur systematisch zu reduzieren.

Abb. 1 zeigt die resultierende Regelungsstruktur, bei welcher die Teilsysteme S_i auf Basis der gegenseitigen Kopplungen in sog. Cluster C_j eingeteilt werden. Jedem Cluster wird dabei eine untere Regelungsebene zugewiesen (grün), welche volle Kommunikation zwischen allen Mitgliedern eines Clusters erfordert. Zusätzlich wird eine zweite Regelungsebene (blau) eingeführt, welche einen Informationsaustausch zwischen den Clustern implementiert und damit eine übergeordnete Koordinations-ebene darstellt. Im Sinne einer Hierarchie arbeitet die obere Ebene mit einer geringe-

ren Abtastrate. Der Vortrag stellt als Alternative einen Ansatz zum Entwurf einer asynchron arbeitenden oberen Regelungsebene vor. Im asynchronen Betrieb sind die Regler auf der oberen Ebene abwechselnd und nach einem vorgegebenen, sequentiellen Schema aktiv, wobei jeder einzelne Regler mit geringerer Abtastrate im Vergleich zur unteren Reglerebene arbeitet. Gegenüber dem Ansatz in [5] mit synchroner oberer Reglerebene, hat das asynchrone Schema den Vorteil, dass die Auslastung des Kommunikationsnetzes über der Zeit eine geringere Varianz aufweist und Spitzenauslastungen somit vermieden werden. Als Rahmen für die Modellierung und den Entwurf einer solchen asynchronen oberen Regelungsebene dient dabei die Klasse der periodischen Systeme [7], [8]. Anhand von Simulationsergebnissen eines Anwendungsbeispiels werden der Entwurfsaufwand, die Performanz und der Kommunikationsumfang für das synchrone und asynchrone Vorgehen verglichen. Zum Abschluss geben wir auf Basis von [9] einen Ausblick, wie die vorgestellte Reglerstruktur im Sinne eines vernetzten Regelungssystems robust gegenüber typischen Netzwerkeffekten wie Paketausfällen oder dem kompletten Ausfall einzelner Kommunikationsverbindungen entworfen werden kann.

Literatur:

- [1] D. Groß und O. Stursberg: Optimized distributed control and network topology design for interconnected systems. In: Proc. Conf. on Decision and Control, S. 8112 – 8117, 2011.
- [2] M. Rafiee und A.M. Bayen: Optimal network topology design in multi-agent systems for efficient average consensus. In: Proc. Conf. on Decision and Control, S. 3877 – 3883, 2010.
- [3] S. Schuler, P. Li, J. Lam und F. Allgöwer: Design of structured dynamic output-feedback controllers for interconnected systems. International Journal of Control, Vol. 84(12), S. 2081 – 2091, 2011.
- [4] M. Fardad und M.R. Jovanović: On the design of Optimal Structured and Sparse Feedback Gains via Sequential Convex Programming. In: Proc. of the American Control Conf., S. 2426 – 2431, 2014.
- [5] M. Jilg und O. Stursberg: Hierarchical Distributed Control for Interconnected Systems. In: Proc. IFAC Symposium of Large Scale Complex Systems, S. 419 – 425, 2013.
- [6] D.D. Šiljak: Decentralized Control of Complex Systems. Academic Press, 1991.
- [7] S. Bittanti und P. Colaneri: Periodic Systems: Filtering and Control. Springer, 2009.
- [8] C. Farges, D. Peaucelle, D. Arzelier und J. Daafouz: Robust H₂ performance analysis and synthesis of linear polytopic discrete-time periodic systems via LMIs. Systems and Control Letters, Vol. 56, S. 159 – 166, 2007.
- [9] M. Jilg, J. Tonne und O. Stursberg: Design of Distributed H₂-Optimized Controllers Considering Stochastic Communication Link Failures. Eingereicht zur American Control Conference, 2015.

Strukturelles und analytisches Modell des Zeitverhaltens von Steuerungssystemen

Stephan Höme *

Christian Diedrich **

* Lehrstuhl für Integrierte Automation
Institut für Automatisierungstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
0391 67 11351
0391 67 11186
stephan.hoeme@ovgu.de

** Lehrstuhl für Integrierte Automation
Institut für Automatisierungstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
0391 67 18499
0391 67 11186
christian.diedrich@ovgu.de

Schlüsselwörter: Verteilte Steuerungssysteme, industrielle Kommunikation, Modellbildung

Die Kenntnis des Zeitverhaltens von industriellen Steuerungssystemen ist für viele Anwendungsfälle notwendig. Bei zyklisch arbeitenden Systemen ist diese Zeitdauer nicht nur durch die eigentlichen Verarbeitungszeiten der Teilfunktionen einzelner Komponenten bestimmt, sondern auch durch Wartezeiten aufgrund von asynchronen arbeitenden Teilsystemen (siehe Abbildung 1). Im Rahmen dieses Beitrages soll ein Berechnungsmodell

vorgestellt werden, mit welchem sich ein zyklisch arbeitendes, verteiltes Steuerungssystem auf analytischer Basis bewerten lässt. Aus diesem Modell kann das Zeitverhalten entlang verschiedener Signalpfade abgeleitet werden.

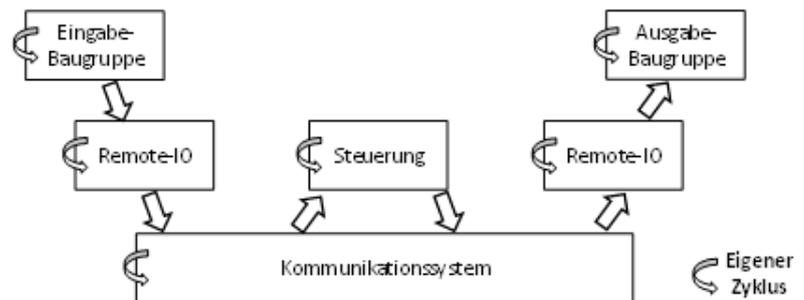


Abbildung 1: Struktur eines Steuerungssystems mit zyklisch arbeitenden Teilsystemen

Das abstrakte Modell beschreibt die Struktur eines Steuerungssystems aus seinen Teilsystemen und deren Beziehungen untereinander. Darauf aufbauend werden die dynamischen Aspekte mit Hilfe der Modellierung der Signalpfade abgebildet. Diese Trennung ermöglicht es, verschiedene funktionale Pfade in einem komplexen verteilten Steuerungssystem effizient abzubilden.

Abhängig von der Art der Beschreibungsparameter des Systems werden verschiedene Wege zur Berechnung des konkreten Zeitverhaltens der Klemme-Klemme-Reaktionszeit gezeigt. Im Ergebnis kann für jeden Pfad eine Häufigkeitsverteilung der zu erwartenden Zeiten ermittelt werden, ohne dass die konkrete Anlage aufgebaut werden muss.

Das beschriebene Modell wird mit Hilfe von Messungen an Standard-Steuerungskomponenten validiert und erreicht hier trotz des hohen Abstraktionsgrades eine sehr hohe Übereinstimmung.

Dieser Ansatz erlaubt den Vergleich von verschiedenen Topologien, Konfigurationen und auch Systemen hinsichtlich ihrer Eignung für eine vorgegebene Aufgabe. Da nicht nur die maximal zu erwartende Zeit ermittelt wird, lassen sich daraus auch qualitative und quantitative Aussagen über die erreichbare Güte mit einer spezifischen Konfiguration treffen.

Literatur:

- [1] S. Höme, C. Diedrich, "Analyse des Zeitverhaltens von Steuerungssystemen mit zyklischer Kommunikation," in Kommunikation in der Automation: 3. Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, 2012, p. 7.
- [2] T. Hadlich, S. Höme, C. Diedrich, K. Eckert, T. Frank, A. Fay, and B. Vogel-Heuser, "Time as non-functional requirement in distributed control systems," in Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012), Piscataway, NJ: IEEE, 2012.
- [3] S. Höme, S. Palis, and C. Diedrich, "Design of communication systems for networked control system running on PROFINET," in 10th IEEE Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2014), 2014.
- [4] S. Höme, C. Diedrich, "Analytisch bestimmtes Zeitverhalten für verteilte Steuerungssysteme," in Kommunikation in der Automation: 5. Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, 2014.

Verteilter Reglerentwurf in großen vernetzten Systemen mit lokalem Modellwissen

Frederik Deroo

Sandra Hirche

Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung
Technische Universität München
Barer Str. 21
+49 89 289 25739
+49 89 289 25724
fred.deroo@tum.de

Schlüsselwörter: Verteilte Regelung, verteilter Entwurf, Stabilität, lokales Modellwissen

Die verteilte Regelung in großen vernetzten Systemen ist ein wichtiges Forschungsgebiet mit der gesellschaftlich wichtigen Anwendung in verteilten Infrastruktursystemen wie zum Beispiel Energieversorgungsnetzen, Wasserverteilnetzen und Verkehrsnetzen.

Das Gesamtsystem besteht aus mehreren Sub-Systemen, die sich gegenseitig physikalisch beeinflussen. Ein verteiltes Regelgesetz nutzt dann Kommunikation zwischen manchen – aber nicht allen – Sub-Systemen. Ziel ist es, eine bessere Performanz als mit vollständig dezentraler Regelung zu erreichen. Bisherige Entwurfsansätze für verteilte Regelungen gehen davon aus, dass das globale Modellwissen einer einzelnen zentralen Einheit zum Entwurfszeitpunkt zur Verfügung steht. Diese Annahme ist weitestgehend unrealistisch allein wegen Bedenken bezüglich der Privatsphäre und Betriebsgeheimnissen zwischen verschiedenen wirtschaftlichen Einheiten, der mangelhaften Skalierbarkeit und den begrenzten Möglichkeiten der Echtzeit-Rekonfiguration.

In dieser Arbeit wird ein neues Konzept zum verteilten Reglerentwurf für große Systeme vorgestellt, bei dem auch der Entwurfsschritt verteilt erfolgt. Es gibt nun nicht mehr eine zentrale Einheit mit globalem Modellwissen, sondern lokale Entwurfseinheiten mit lokalem Modellwissen über die benachbarten Sub-Systeme.

Für den Entwurf des verteilten Reglers tauschen die Sub-Systeme nur Informationen (Messsignale, Modelldaten, simulierte Trajektorien) mit direkt benachbarten Systemen aus. Mittels eines verteilten Gradientenverfahrens wird ein Regler entworfen, der optimal bezüglich eines linear quadratischen Kostenfunktionalis über einen endlichen Horizon ist. Die Schrittweite des Gradientenverfahrens wird ebenfalls verteilt bestimmt, und Konvergenz wird garantiert. Um die Stabilität des geschlossenen Kreises zu garantieren wird eine Lyapunovfunktion über ein verteiltes Optimierungsverfahren ermittelt.

Diese dient als Endkostenterm im verteilten Entwurf. Durch das vorgestellte Konzept ist es möglich, ein garantiert stabilisierendes verteiltes Regelgesetz mit einem verteilten Entwurf zu bestimmen.

Literatur:

- [1] F. Deroo; M. Ulbrich; B.D.O. Anderson; S. Hirche: Accelerated Iterative Distributed Controller Synthesis with a Barzilai-Borwein Step Size. Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2012
- [2] F. Deroo; M. Ulbrich; S. Hirche; B. D. O. Anderson: Distributed controller design for a class of sparse singular systems with privacy constraints. 4th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (Necsys), 2013
- [3] F. Deroo; M. Meinel; M. Ulbrich; S. Hirche: Distributed control design with local model information and guaranteed stability. 19th IFAC World Congress, 2014

Ein Algorithmus mit linearer Laufzeit zum Nachweis der strengen strukturellen Steuerbarkeit

Alexander Weber*, Gunther Reissig* und Ferdinand Svaricek*

* Institut für Steuer- und Regelungstechnik
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg
Fax: 089-6004-4565
{a.weber,ferdinand.svaricek}@unibw.de

Schlüsselwörter: Lineare Systeme, strukturelle Analyse, strenge strukturelle Steuerbarkeit, numerische Berechnung, dünnbesetzte Matrizen

Es ist seit vielen Jahren bekannt [1], dass viele grundlegende Eigenschaften linearer Systeme ihrem Wesen nach strukturelle Eigenschaften sind und mit Hilfe von Strukturmodellen beschrieben und untersucht werden können. Als strukturelle Matrizen werden Matrizen bezeichnet, deren Einträge entweder 0 oder das Symbol * sind. Die strenge strukturelle Steuerbarkeit eines Paares $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ struktureller Matrizen \mathcal{A} und \mathcal{B} bedeutet per Definition [2], dass jedes lineare Zustandsraummodell der Form $\dot{x}(t) = \mathcal{A}x(t) + \mathcal{B}u(t)$, für welches die gewöhnlichen $n \times n$ bzw. $n \times r$ Matrizen A bzw. B dieselbe Dimension und Struktur wie \mathcal{A} bzw. \mathcal{B} haben, steuerbar ist. Dabei korrespondieren Nicht-Null-Einträge der gewöhnlichen Matrizen zu den * - Einträgen der strukturellen Matrizen.

Der strukturelle Ansatz hat in den letzten Jahren bei der Analyse und Synthese komplexer Netzwerke wieder eine große Bedeutung erlangt. Dies verdeutlicht auch die große Resonanz auf einen Nature-Artikel zur Steuerbarkeit komplexer Netzwerke [3], der in nur drei Jahren inzwischen fast 600-mal zitiert worden ist.

Schnelle Algorithmen zur Überprüfung der strengen strukturellen Steuerbarkeit eines Paares $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ sind bei der Analyse komplexer Netzwerke z.B. bei folgender Problemstellung von Bedeutung: Für ein vorgegebenes \mathcal{A} soll ein \mathcal{B} mit einer minimalen Anzahl von Spalten so gefunden werden, dass das Paar $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ strukturell bzw. streng strukturell steuerbar ist [3,4]. Dazu werden Netzwerke mit Hilfe linearer Zustandsraummodelle der Form $\dot{x}(t) = \mathcal{A}x(t) + \mathcal{B}u(t)$ beschrieben, wobei A die gewichtete Adjazenzmatrix des zugrunde liegenden Graphen ist und B diejenigen Knoten identifiziert, die von außen angesteuert werden können. Beispiele solcher Netzwerke sind Genregulationsnetzwerke und neuronale Netze. Diese Beschreibung von Netzwerken führt unmittelbar auf die oben genannte Problemstellung, wenn es darum geht den Rechenaufwand zur Erzeugung von Eingangssignalen, um das Netzwerk gezielt zu beeinflussen, zu minimieren.

Der Grund, weshalb bei der oben genannten Problemstellung schnelle Algorithmen zur Prüfung der strengen struktureller Steuerbarkeit eines Paares $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ von grundlegender Bedeutung sind, ist der folgende: In [4] wurde gezeigt, dass das genannte Problem NP-schwer ist. Ansätze, die die NP-Schwere umgehen, wie beispielsweise

durch Betrachtung der Problemstellung für die Eigenschaft der strukturellen Steuerbarkeit, weisen allesamt Nachteile auf.

Neben der oben dargestellten Verwendung solcher Algorithmen, können diese auch für die Analyse zeitvarianter Zustandsraummodelle eingesetzt werden. In [5] wurde dazu kürzlich gezeigt, dass die strenge strukturelle Steuerbarkeit linearer zeitvarianter Systeme unter gewissen Voraussetzungen auf die Prüfung zeitinvarianter Systeme, ggf. mit modifizierter Besetztheitsstruktur, zurückgeführt werden kann.

Algorithmen zur Bestimmung der strengen strukturellen Steuerbarkeit, die eine Laufzeitkomplexität kubisch bzw. quadratisch in der Anzahl n an Zeilen von \mathcal{A} haben, wurden in [6] bzw. [4] veröffentlicht. In diesem Vortrag wird der kürzlich veröffentlichte Algorithmus aus [7] präsentiert, der eine in $n + r + \nu$ lineare Laufzeitkomplexität aufweist, wobei ν die Anzahl an $*$ -Einträgen von $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ bezeichnet. Dazu wird zunächst auf eine Methode zur Bestimmung der strengen strukturellen Steuerbarkeit aus [5] eingegangen, die schließlich auf den präsentierten Algorithmus führt. Die angegebene Komplexität wird durch die Verwendung von Rechentechniken für dünnbesetzte Matrizen und das Verwenden eigens für diesen Algorithmus eingeführter Datenstrukturen erreicht. Diese Datenstrukturen werden erläutert und es wird an Beispielen ihre Funktionsweise innerhalb des Algorithmus dargelegt. Schließlich wird die hergeleitete Komplexität an Rechenergebnissen illustriert.

Literatur:

- [1] C. T. Lin. Structural controllability. *IEEE Trans. on Automatic Control*, S. 201–208, 1974.
- [2] F. Svaricek, J. Jarczyk und B. Alt: Strukturelle und streng strukturelle Steuerbarkeit: Übersicht und neue Ergebnisse. *Automatisierungstechnik*, at 59, S. 329-339, 2011.
- [3] Y.-Y. Liu, J.-J. Slotine, and A.-L. Barabási: Controllability of complex networks, *Nature*, Vol. 473, S. 167–73, May 2011.
- [4] A. Chapman and M. Mesbahi: On strong structural controllability of networked systems: A constrained matching approach, *Proc. American Control Conf. (ACC)*, 2013, S. 6126-6131.
- [5] G. Reissig, C. Hartung and F. Svaricek: Strong structural controllability and observability of linear time-varying systems, *IEEE Trans. Automat. Control*, 2014, S. 3087-3092.
- [6] K. J. Reinschke, F. Svaricek und H.-D. Wend: On strong structural controllability of linear systems, *Proc. 31st IEEE Conf. Decision and Control (CDC)*, 1992, S. 203-208.
- [7] A. Weber, G. Reissig and F. Svaricek: A linear time algorithm to verify strong structural controllability, *Proc. 53rd IEEE Conf. Decision and Control (CDC)*, 2014.

Flachheitsbasierte Regelung eines hochdynamischen hydraulischen Hexapoden mit Sliding-Mode-Beobachtern

Sarah Flottmeier

Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn
Regelungstechnik und Mechatronik
Fürstenallee 11, 33102 Paderborn
Tel. 05251 60 6303
sarah.flottmeier@hni.upb.de

Schlüsselwörter: Parallelkinematik, Kalman-Filter, Sliding-Mode-Beobachter, Flachheitsbasierte Regelung, Hexapod

Grundsätzlich lassen sich Regelungen für Parallelkinematiken (PKM) nach der geregelten Größe in Regelungen in Gelenkkoordinaten (engl. joint space (JS)) und Regelungen in globalen Koordinaten (engl. operational space, (OS)) einteilen. Für Regelungen im JS wird die Sollvorgabe für die Bewegung des Endeffektors, die im Allgemeinen in globalen Koordinaten erfolgt, durch die Lösung des inversen kinematischen Problems (IKP) in Gelenkkoordinaten transformiert. Da die entsprechenden Ist-Größen in der Regel direkt als Messgrößen zur Verfügung stehen, können die Aktoren im einfachsten Fall lokal mit einer Einzelaktorregelung geregelt werden. Das Ausschöpfen des strukturbedingten Potentials von PKM erfordert jedoch die Berücksichtigung der Systemdynamik innerhalb der Regelstruktur [1].

In der Literatur finden sich zahlreiche Ansätze zur Mehrgrößenregelung von PKM, die eine modellbasierte Berücksichtigung der Gesamtsystemdynamik vorsehen. Allen gemein ist die Tatsache, dass die einzelnen Aktoren als lokal kraftgeregelt angenommen werden - die Ausgangsgröße der globalen Regelung entspricht demnach dem Vektor der Aktorkräfte im JS. Die Mehrheit dieser Ansätze kann entweder als Zwei-Freiheitsgrade-Regelung mit flachheitsbasierter Vorsteuerung in Kombination mit einer nichtlinearen Regelung oder als flachheitsbasierte Folgeregelung (vgl. [2]) interpretiert werden. In beiden Fällen kann der Soll-Istwertvergleich zur Kompensation von Modellunsicherheiten und Störungen grundsätzlich im JS oder OS erfolgen.

Im Falle einer flachheitsbasierten Folgeregelung wird dem nichtlinearen System durch exakte Zustandslinearisierung lineares Verhalten aufgeprägt und der Reglerentwurf kann am vereinfachten, linearen System erfolgen. Für die Berechnung der Terme zur Zustandslinearisierung müssen die aktuelle Position, Orientierung und Geschwindigkeit des Endeffektors in globalen Koordinaten bekannt sein. In der Regel sind jedoch nur Messgrößen in Gelenkkoordinaten verfügbar. Eine analytisch eindeutige Berechnung der globalen Größen aus diesen Daten (direktes kinematisches Problem, DKP) ist für PKM nicht möglich. Daher werden in der Praxis häufig die Sollgrößen zur Berechnung der nichtlinearen Terme verwendet (z. B. [3]). Dann wird aus der flachheitsbasierten Folgeregelung eine klassische Zwei-Freiheitsgrade-Regelung mit flachheitsbasierter Vorsteuerung und nichtlinearer Regelung.

Eine naheliegende Lösung für die analytische Nichtlösbarkeit des DKP ist die Verwendung von Zustandsschätzern. Sie ermöglichen die Umsetzung der exakten Zu-

standslinearisierung für PKM sowie die Realisierung eines Soll-Istwertvergleichs im OS. In [4] wurde dazu z. B. erfolgreich ein Sliding-Mode-Beobachter entworfen.

Zur Umsetzung der o. g. Regelstrategien für PKM mit sechs Freiheitsgraden (FHG) sind noch einige Fragen offen. Das gilt speziell im Hinblick auf Regelungen mit einer Bandbreite im höheren zweistelligen Hz-Bereich für kontinuierliche Sollvorgaben, die im Vorfeld nicht bekannt sind. Entsprechende Arbeiten wurden im Zuge einer Literaturrecherche nicht offenkundig. Einige Autoren vertreten die These, dass flachheitsbasierte Folgeregelungen im OS für hochdynamische Anwendungen besser geeignet sind, als Regelungen im JS mit flachheitsbasierter Vorsteuerung, so z. B. [5]. Dennoch werden letztere aus Gründen der Echtzeitfähigkeit vielfach umgesetzt und empfohlen. Es stellt sich demnach folgende Frage:

Was eignet sich besser zur Regelung von PKM mit dem Ziel einer möglichst hohen Bandbreite? Eine Zwei-Freiheitsgrade-Regelung mit flachheitsbasierter Vorsteuerung und nichtlinearer Regelung im JS, bei der auf die Lösung des DKP verzichtet wird, oder eine flachheitsbasierte Folgeregelung im OS, die auf einer Lösung des DKP mittels Zustandsschätzung basiert?

Ziel des Vortrags ist es, einen Beitrag zur Beantwortung dieser Fragestellung zu leisten. Dabei werden zunächst die flachheitsbasierten Regelstrategien erläutert, geeignete Schätzverfahren zur Lösung des DKP vorgestellt und Realisierungseffekte diskutiert. Es folgt die Analyse der Leistungsfähigkeit der Regelungsansätze anhand von Messdaten, die mit Hilfe eines hydraulischen Hexapoden (vgl. Abbildung 1), der Teil eines Prüfstands für PKW-Achsen ist, generiert wurden.

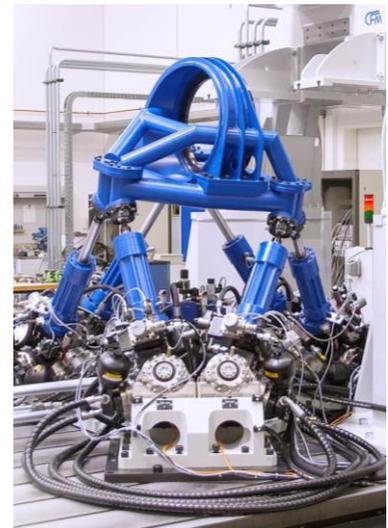


Abbildung 1:
Hydraulischer Hexapod

Literatur:

- [1] Brecher, C.; Ostermann, T.; Friedrich, D. A.: Control concept for PKM considering the mechanical coupling between actors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48 (2008) Nr. 3-4, S. 427-436
- [2] Rothfuß, R.; Rudolph, J.; Zeitz, M.: Flachheit: Ein neuer Zugang zur Steuerung und Regelung nichtlinearer Systeme. *at - Automatisierungstechnik* 45 (1997), Nr. 11, S. 517-525
- [3] Abdellatif, H.; Heimann, B.; Kotlarski, J.: Passivity-Based Observer/Controller Design with Desired Dynamics Compensation for 6 DOFs Parallel Manipulators. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nizza, Frankreich, 2008
- [4] Flottmeier, S.; Olma, S.; Trächtler, A.: Sliding Mode and Continuous Estimation Techniques for the Realization of Advanced Control Strategies for Parallel Kinematics. *19th IFAC World Congress*, Kapstadt, Südafrika, 2014
- [5] Paccot, F.; Andreff, N.; Martinet, P.: A Review on the Dynamic Control of Parallel Kinematic Machines: Theory and Experiments. *The International Journal of Robotics Research* 28 (2009), Nr. 3, S. 395-416

Trajektorienfolgeregelung für eine adaptive gekoppelte Balkenstruktur

Andreas Kater

Lehrstuhl für Regelungstechnik
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Kaiserstraße 2 / 24143 Kiel
Tel.: +49 (0) 431 880-6276
Fax: +49 (0) 431 880-6278
aka@tf.uni-kiel.de

Thomas Meurer

Lehrstuhl für Regelungstechnik
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Kaiserstraße 2 / 24143 Kiel
Tel.: +49 (0) 431 880-6275
Fax: +49 (0) 431 880-6278
tm@tf.uni-kiel.de

Schlüsselwörter: Adaptive Strukturen, Euler-Bernoulli Balken, Piezoelektrische Aktoren, Trajektorienfolgeregelung, Flachheit, Passivität, Trajektorienplanung

Adaptive flexible Strukturen sind durch die Integration aktorischer und sensorischer Elemente in eine elastische Trägerstruktur gekennzeichnet. Dies ermöglicht u.a. die aktive Schwingungsdämpfung in Leichtbaustrukturen oder die aktive Formkontrolle zur Einstellung vorgegebener Profile, was beispielsweise im Bereich der adaptiven Optik von Bedeutung ist. Zudem kann es in Bereichen der Luft- und Raumfahrttechnik, der Automobil- oder Schiffstechnik vorteilhaft sein, durch eine aktive Strukturveränderung Einfluss auf die Umströmung auszuüben, um beispielsweise Auftrieb zu erzielen oder Strömungswiderstände zu reduzieren. Hierzu sind neben geeigneten „intelligenten“ Materialien insbesondere geeignete Strategien zur Trajektorienplanung (örtlich und zeitlich) und Formregelung notwendig.

Diese sind Gegenstand dieses Beitrags, in dem ein Ansatz zur Trajektorienfolgeregelung für verteilt-parametrische Systeme anhand der in Abb. 1 schematisch dargestellten elastisch gekoppelten Balkenstruktur vorgestellt wird. Dabei wird das Ziel verfolgt, ein gewünschtes räumliches und zeitliches Auslenkungsprofil der gekoppelten Balkenstruktur senkrecht zu der durch die Balken aufgespannten Ebene einzustellen. In die einzelnen Balken geeignet platzierte integrierte piezoelektrische Aktoren dienen als Stelleingänge für das System.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der gekoppelten Balkenstruktur.

Den Ausgangspunkt der Trajektorienplanung und des Regelungsentwurfs bildet die verteilt-parametrische Systembeschreibung auf Grundlage der Euler-Bernoulli Balkentheorie unter Einbezug der piezoelektrischen Konstitutivgleichungen (siehe z.B. [1,2]). Die Kopplung der Balken wird durch elastische Saiten erzielt, die jeweils an Endmassen der Balken befestigt sind. Mit dieser Konfiguration soll eine erste, für die Methodenentwicklung und -evaluation zunächst deutlich abstrahierte Realisierung einer flächig aktudierbaren adaptiven Struktur mit internen Kopplungen erzielt werden. Unter Ausnutzung der spektralen Eigenschaften des Systemoperators, wird ein flachheitsbasierter Zugang zur differenziellen Parametrierung der Auslenkungsprofils und der Eingangsspannungen an die Aktoren entwickelt. Dies erlaubt es, durch die Vorgabe einer geeigneten Solltrajektorie für den flachen Ausgang, unmittelbar eine

Vorsteuerung so zu entwerfen, dass dem gekoppelten System eine gewünschte räumliche und zeitliche Bewegung („Rest-to-Rest Motion“) eingeprägt wird [2,3]. Um zu gewährleisten, dass das System dem gewünschten Sollverlauf auch unter dem Einfluss von Modellfehlern und Störungen folgt, wird mit Hilfe der Lyapunovschen Stabilitätstheorie ein passivitätsbasierter Regler für das verteilt-parametrische Folgefehlersystem entworfen, der die Stabilität des geschlossenen Regelkreises garantiert. Numerische Simulationen unter Ausnutzung des Galerkin-Verfahrens und experimentelle Ergebnisse illustrieren die so erzielbare Regelgüte.

Literatur:

- [1] H.T. Banks, R.C. Smith, Y. Wang, Smart Material Structures – Modeling, Estimation and Control, (Masson, Paris, 1996)
- [2] T. Meurer, Control of Higher-Dimensional PDEs - Flatness and Backstepping Designs, (Springer, Berlin, 2013)
- [3] J. Schröck, T. Meurer, A. Kugi, Motion Planning for Piezo-Actuated Flexible Structures: Modeling, Design, and Experiment. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 21(3), 807-819, (2013).

Beiträge zur Positionsregelung für Multikopter: Theorie und Praxis

David Kastelan

Matthias Konz

Joachim Rudolph

Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität des Saarlandes
Campus A5 1, 66123 Saarbrücken

+49-681-302-64724
d.kastelan@lrs.uni-saarland.de

+49-681-302-64729
m.konz@lrs.uni-saarland.de

+49-681-302-64721
j.rudolph@lrs.uni-saarland.de

Schlüsselwörter: Flachheitsbasierte Folgeregelung, geometrische Methoden, Echtzeitrealisierung

Unbemannte Kleinfluggeräte vom Typ Multikopter sind inzwischen weit verbreitet, vom Hobby- bis in den militärischen Bereich und auch als experimentelle Plattform an regelungs- und automatisierungstechnischen Forschungseinrichtungen.

Im Vortrag werden zunächst die am Lehrstuhl entwickelten Trikoopter und Quadropter (Abb. 1) vorgestellt. Während letztere wie üblich durch fest montierte Propeller angetrieben werden, können die Propeller beim Trikoopter zusätzlich individuell geschwenkt werden. Als Sensoren dienen mitgeführte Inertialmesssysteme und ein stationäres Kamerasystem.



Abb. 1: Multikopter

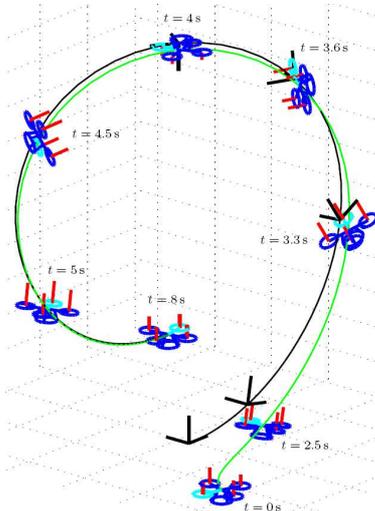


Abb. 2: Beispielmanöver

Aus Sicht der Regelungstechnik ist unter anderem die modellbasierte Folgeregelung der Position und der Orientierung dieser Fluggeräte interessant. Während für langsame Manöver in der Umgebung des stationären Schwebens die Betrachtung eines linearisierten Starrkörpermodells ausreicht, muss für aggressivere Manöver (wie in Abb. 2) ein nichtlineares Modell herangezogen werden. Sollen hohe Beschleunigungen realisiert werden, sind auch technologische Stellgrößenbeschränkungen relevant.

Die im Vortrag vorgeschlagene Folgeregelung besteht aus zwei Komponenten, der Planung einer Referenztrajektorie und deren Stabilisierung. Für beides ist die differentielle Flachheit des Quadropter-Modells hilfreich. Eine Herausforderung für eine globale Stabilisierung ist, dass die Orientierung eines Multikopters durch die Rotationsgruppe beschrieben wird, also eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit, die nicht global isomorph zum \mathbb{R}^3 ist. Der vorgeschlagene Ansatz nutzt daher speziell definierte Fehlerkoordinaten und eine diesen zugeordnete nichtlineare Fehlerdynamik. Die Wahl beider ist aus der Geometrie des Problems motiviert.

Die Funktionalität der auf einem Quadropter realisierten Regelungsalgorithmen wird abschließend anhand experimenteller Ergebnisse demonstriert.

Zur Bedeutung von Dissipativität und Durchschnittsbeschränkungen bei der ökonomischen prädiktiven Regelung

Matthias A. Müller *

Frank Allgöwer **

* Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik

** Institut für Systemtheorie und
Regelungstechnik

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Tel.: +49 711 68567750
Fax: +49 711 68567735

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Tel.: +49 711 68567733
Fax: +49 711 68567735

E-Mail: matthias.mueller@ist.uni-stuttgart.de

E-Mail: frank.allgower@ist.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: ökonomische prädiktive Regelung, Dissipativität, Durchschnittsbeschränkungen

Die ökonomische prädiktive Regelung (Englisch: *Economic model predictive control*) ist ein prädiktives Regelungsverfahren, bei dem das primäre Regelziel nicht die Stabilisierung eines vorgegebenen Sollwertes ist, sondern die Optimierung eines allgemeinen Gütekriteriums, wie beispielsweise der Minimierung von (Energie-)kosten oder der Profitmaximierung [1,2]. Dies bedeutet, dass die Zustandskosten, die in dem in jedem Zeitschritt zu lösenden Optimierungsproblem verwendet werden, nicht wie in stabilisierenden prädiktiven Regelungsverfahren üblich positiv definit sind. Als Folge ist der geschlossene Kreis nicht notwendigerweise konvergent, da andere (z.B. periodische) Trajektorien zu einer besseren Regelgüte bezüglich des gegebenen Gütekriteriums führen können.

In diesem Vortrag diskutieren wir zwei Aspekte, die für die ökonomische prädiktive Regelung eine wichtige Rolle spielen: eine Dissipativitätseigenschaft sowie Durchschnittsbeschränkungen. In [1] wurde gezeigt, dass eine bestimmte Dissipativitätsbedingung hinreichend für den optimalen Betrieb eines Systems am optimalen Gleichgewichtspunkt ist. Dies bedeutet, dass keine andere Betriebsart (z.B. periodisch) eine bessere Regelgüte (bezüglich der gegebenen Kostenfunktion) liefern kann als der Betrieb des Systems am optimalen Gleichgewichtspunkt. Unter einer (lokalen) Kontrollierbarkeitsannahme ist diese Dissipativitätsbedingung nicht nur hinreichend, sondern auch notwendig für diese Systemeigenschaft [3]. Dieser Umkehrsatz ist insofern von besonderer Relevanz, als er Aussagen über den geschlossenen Regelkreis erlaubt, ohne dass die erwähnte Dissipativitätseigenschaft verifiziert werden muss (wofür im allgemeinen nichtlinearen Fall keine systematische Prozedur existiert).

Wie bereits oben erwähnt ist der geschlossene Kreis bei Anwendung eines ökonomischen prädiktiven Regelungsverfahrens nicht notwendigerweise konvergent. In diesem Fall sind neben den (klassischen) Eingangs- und Zustandsbeschränkungen, die zu jedem Zeitpunkt erfüllt sein müssen, auch Beschränkungen auf Durchschnittswerte von Systemgrößen relevant und müssen online (innerhalb des in jedem Zeitschritt gelösten Optimierungsproblems) berücksichtigt werden. Wir zeigen, wie solche Durchschnittsbeschränkungen in ökonomische prädiktive

Regelungsverfahren integriert werden können, sodass ihre Einhaltung für den geschlossenen Kreis garantiert werden kann [4].

Literatur:

[1] D. Angeli, R. Amrit, and J. B. Rawlings. On average performance and stability of economic model predictive control, *IEEE Transactions on Automatic Control* 57(7), pp. 1615-1626, 2012.

[2] M. Ellis, H. Durand, and P. D. Christofides. A tutorial review of economic model predictive control methods, *Journal of Process Control* 24(8), pp. 1156-1178, 2014.

[3] M. A. Müller, D. Angeli, and F. Allgöwer. On necessity and robustness of dissipativity in economic model predictive control, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, to appear. DOI: 10.1109/TAC.2014.2361193

[4] M. A. Müller, D. Angeli, F. Allgöwer, R. Amrit, and J. B. Rawlings. Convergence in economic model predictive control with average constraints, *Automatica*, 2014, to appear. DOI: 10.1016/j.automatica.2014.10.059

Modellprädiktive Regelung basierend auf relaxierten Barrierefunktionen

Christian Feller *

* Institut für Systemtheorie und
Regelungstechnik, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Telefon: 0711 – 685 67745
Fax: 0711 – 685 67735
christian.feller@ist.uni-stuttgart.de

Christian Ebenbauer *

* Institut für Systemtheorie und
Regelungstechnik, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Telefon: 0711 – 685 67730
Fax: 0711 – 685 67735
ce@ist.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Lineare Systeme, MPC, Barrierefunktionen, Stabilität, Algorithmen

Die modellprädiktive Regelung (engl.: Model Predictive Control, MPC) ist ein optimierungsbasiertes Konzept zur Regelung komplexer dynamischer Prozesse, welches auf der wiederholten Lösung eines geeigneten Optimalsteuerungsproblems basiert und die Behandlung gegebener Stellgrößen- und Zustandsbeschränkungen erlaubt [1]. Bei der Auslegung und Anwendung von MPC-Verfahren ist neben der garantierten Stabilität des geschlossenen Regelkreises vor allem auch die effiziente Lösbarkeit des zu Grunde liegenden Optimalsteuerungsproblems von großer Bedeutung. Viele Ansätze garantieren hierbei die gewünschten theoretischen Eigenschaften durch die Verwendung geeigneter Endzustandsbeschränkungen, welche jedoch zu numerischen Problemen führen können. Im Hinblick auf die praktische Implementierung sind zudem auch die Dynamik des zu Grund liegenden Optimierungsverfahrens und die Effizienz des resultierenden MPC-Algorithmus sowie dessen Robustheit gegenüber Störungen und Sensorfehlern von besonderer Relevanz.

In diesem Vortrag stellen wir einen neuen Ansatz für die modellprädiktive Regelung linearer Systeme vor, welcher die Stabilität des geschlossenen Regelkreises auch unter Berücksichtigung bestimmter Implementierungsaspekte gewährleistet sowie eine einfache und robuste Formulierung des zugehörigen Optimalsteuerungsproblems erlaubt. Insbesondere präsentieren wir ein MPC-Verfahren, das asymptotische Stabilität des geschlossenen Regelkreises garantiert, dabei keinerlei explizite Beschränkung des prädizierten Endzustands erfordert und robust gegen Störungen und Sensorfehler ist [2]. Der vorgestellte Ansatz basiert hierbei auf dem Einsatz sogenannter relaxierter logarithmischer Barrierefunktionen, welche es uns erlauben, die optimale Stellgröße als das Minimum einer global definierten und konvexen Funktion zu formulieren [3]. Wir geben eine umfassende Analyse der resultierenden theoretischen Eigenschaften und weisen auf die Vor- und Nachteile des diskutierten Ansatzes im Hinblick auf die praktische Implementierung hin.

Literatur:

- [1] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao, P. O. M. Scokaert, *Constrained model predictive control: stability and optimality*, Automatica (36), 2000
- [2] C. Feller, C. Ebenbauer, *Relaxed logarithmic barrier function based model predictive control of linear systems*, in Vorbereitung
- [3] C. Feller, C. Ebenbauer, *Continuous-time linear MPC algorithms based on relaxed logarithmic barrier functions*, 19th IFAC World Congress, Kapstadt, 2014
- [4] C. Feller, C. Ebenbauer, *Barrier function based linear model predictive control with polytopic terminal sets*, 53rd IEEE CDC, Los Angeles, 2014

Regelung eines bionischen Kängurus

Sebastian Hentzelt, Knut Graichen

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm

Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm

Telefon: 0731-50-{26309,26304}

Fax: 0731-50-26301

E-Mail: {sebastian.hentzelt,knut.graichen}@uni-ulm.de

Schlüsselwörter: Bionik, Pneumatik, nichtlineare Regelung, Trajektorienplanung

Die Fortbewegungsart des Kängurus ist einzigartig in der Natur. Die starken Hinterbeine ermöglichen dem Känguru, bei jedem Sprung Energie in der Landephase zu speichern und für den nächsten Sprung wiederzuverwenden. Durch diese Form der Energierückgewinnung ist es das einzige Tier im Tierreich, das seine Geschwindigkeit erhöhen und dabei seine Stoffwechselrate konstant halten kann [1].

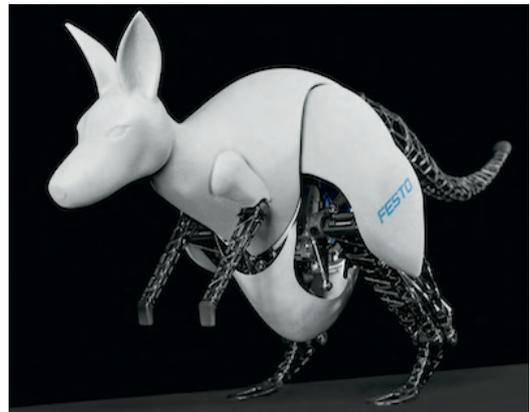


Abbildung 1: BionicKangaroo [2]

Das BionicKangaroo (Abbildung 1) wurde vom Bionic Learning Network der Festo AG & Co. KG entworfen, um die besondere Art der

Energierückgewinnung und das charakteristische Sprungverhalten des Kängurus zu rekonstruieren. Am bionischen Aufbau sind dafür künstliche Achillessehnen und pneumatische Aktoren in der Bein kinematik ausschlaggebend. Zusätzlich sind elektrische Antriebe in den Hüft- und Schwanzgelenken verbaut, um den Hüpfzyklus bestehend aus Flugphase, Landung und Absprung ähnlich dem natürlichen Vorbild stabilisieren zu können.

In der Literatur existieren verschiedene Regelungsansätze für hüpfende Roboter (maßgeblich initiiert durch die Pionierarbeit des Boston Dynamics-Gründers Marc H. Raibert [3]). Allerdings ist das BionicKangaroo ein wesentlich komplexeres System als es in bisherigen Arbeiten betrachtet wurde. Dies betrifft insbesondere die komplexe Sprungkinematik sowie die gleichzeitige Verwendung von Hüft- und Schwanzaktorik zur Stabilisierung der Fortbewegung.

Im Falle des BionicKangaroos werden nichtlineare Regler für die Flug- und Bodenphase verwendet und über eine modellbasierte Schaltbedingung für den Start des nächsten Hüpfzyklus miteinander verknüpft. Für die Regelung der Flugphase kommt ein Zwei-Freiheitsgrade-Ansatz bestehend aus einer nichtlinearen Vorsteuerung [4] und einer unterlagerten zeitvarianten Regelung zum Einsatz. Die Vorsteuerung berechnet die Flugbahn unter Berücksichtigung der Absprungbedingungen des Kängurus und kompensiert somit den Einfluss von Variationen zwischen den einzelnen Sprüngen. Die unterlagerte Regelung verwendet die Hüft- und Schwanzaktorik zur Stabilisierung des BionicKangaroos entlang der Referenztrajektorien.

Neben der Flugphase ist die Bodenphase (bestehend aus Landung und Absprung) wichtig, um ein stabiles Einfedern und Ausgleichen von Verkippungen im Flug bzw. bei der Landung zu gewährleisten und den richtigen Zeitpunkt für den Absprung zu bestimmen. Für ein kontrolliertes Einfedern werden nichtlineare Trajektorienfolgeregler für die Druckverläufe in den Pneumatikzylindern der beiden Beine ausgelegt [5]. Zur Bestimmung des Zeitpunktes für den nächsten Absprung wird eine modellbasierte Schaltbedingung verwendet. Diese Vorgehensweise erlaubt einerseits die separate und performante Regelung der Flug- und Landephase und gewährleistet andererseits die Aneinanderkettung der Regelkonzepte für ein stabiles und energieeffizientes Hüpfen des BionickKangaroos.

Im Vortrag wird zunächst der Aufbau des BionickKangaroos beschrieben und anschließend auf die Modellbildung eingegangen, die eine Voraussetzung für die Herleitung der modellbasierten Regelkonzepte im weiteren Verlauf des Vortrages ist. Die Effizienz der Regelung wird anhand von Simulationen und experimentellen Ergebnissen für das BionickKangaroo veranschaulicht.

Literatur:

- [1] T. Dawson, C. Taylor. Energetic cost of locomotion in kangaroos, *Nature*, 246, 313-134, 1973.
- [2] Festo AG & Co. KG, BionickKangaroo (Broschüre), http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/334102/Festo_BionickKangaroo_de.pdf, 2014.
- [3] M.H. Raibert. Hopping in legged systems Modeling and simulation for the two-dimensional one-legged case. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 14(3), 451-463, 1984.
- [4] K. Graichen, V. Hagenmeyer, M. Zeitz. A new approach to inversion-based feedforward control design for nonlinear systems. *Automatica*, 41(12), 2033-2041, 2005.
- [5] A. Hildebrandt, O. Sawodny, R. Neumann, A. Hartmann. Cascaded control concept of a robot with two degrees of freedom driven by four artificial pneumatic muscle actuators, *Proc. American Control Conference (ACC)*, 680–685, Portland, OR (USA), Juni 2005.

Multi-Objekt-Tracking unter Verwendung von Random Finite Sets

Stephan Reuter *

* Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm
89081 Ulm
+49 731 50 26 332
+49 731 50 26 301
stephan.reuter@uni-ulm.de

Klaus Dietmayer **

** Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm
89081 Ulm
+49 731 50 26 300
+49 731 50 26 301
klaus.dietmayer@uni-ulm.de

Schlüsselwörter: Multi-Objekt-Tracking, Bayes-Filter, Random Finite Sets

Die Realisierung von komplexen automatisierten Fahrfunktionen in zukünftigen Automobilen erfordert eine detaillierte Repräsentation des Fahrzeugumfeldes, welche neben statischen Hindernissen und frei befahrbaren Bereichen auch alle dynamischen Objekte beinhaltet. Die zeitliche Verfolgung und Filterung der dynamischen Objekte wird hierbei durch Multi-Objekt-Tracking-Verfahren realisiert, welche neben der Objektanzahl auch die aktuellen Zustände der einzelnen Objekte unter Nutzung einer Sequenz von Messungen schätzen. Unter der Annahme von linearen Prozess- und Messmodellen sowie normalverteilten Signalen und Wahrscheinlichkeitsdichten ist das Kalman-Filter ein optimaler Zustandsschätzer zur Verfolgung eines Objektes, für das ein Sensor zu jedem Messzeitpunkt genau eine Messung liefert. Zur Verfolgung mehrerer Objekte wird nach dem Stand der Technik zumeist für jedes Objekt ein eigenes Kalman-Filter verwendet, wodurch die Objekte implizit als statistisch unabhängig angenommen werden und eine fehleranfällige Assoziation der Messungen zu den Objekten erforderlich wird. Zu den am weitesten verbreiteten Assoziationsverfahren zählen hierbei die Nächste-Nachbar-Verfahren [1] sowie die probabilistische Datenassoziation [1]. Ein weiteres häufig verwendetes Verfahren, welches simultan die Existenzwahrscheinlichkeit einzelner Objekte schätzt, ist das Joint-Integrated-Probabilistic-Data-Association-Filter [2].

In [3] wurde unter Verwendung der Random Finite Set (RFS) Theorie eine mathematisch fundierte Erweiterung des Bayes-Filters für Multi-Objekt-Anwendungen hergeleitet. Hierbei wird der Multi-Objekt-Zustand durch eine mengenwertige Zufallsvariable repräsentiert, welche auf natürliche Weise sowohl die Unsicherheit bezüglich der Objektanzahl als auch des Zustands der einzelnen Objekte beinhaltet. Außerdem ermöglicht diese Darstellung eine Modellierung von Abhängigkeiten zwischen den Objekten. Um eine fehleranfällige Assoziationsentscheidung im Innovationsschritt zu vermeiden, wird über alle möglichen Assoziationen zwischen den in der Menge vorhandenen Objekten und den empfangenen Messungen gemittelt. Zur Verringerung der Berechnungskomplexität wurden im letzten Jahrzehnt mehrere Approximationen des Multi-Objekt-Bayes-Filters unter Verwendung der statistischen Momente der Multi-Objekt-Verteilung beziehungsweise durch deren Parametrierung entwickelt [3]. Neben der Einschränkung, dass eine Modellierung von Objektabhängigkeiten nicht mehr möglich ist, führen diese Approximationen auch zu ungewünschten Nebeneffekten wie beispielsweise Offsets bei der geschätzten Objektanzahl oder stark schwankenden Objektanzahlen. Eine analytische Implementierung des Multi-Objekt-Bayes-Filters wurde erstmals in [4] unter Verwendung der δ -Generalized-Labeled-Multi-Bernoulli(δ -GLMB)-Verteilung realisiert. Aufgrund der kombinatorischen Komplexität wächst hierbei die Anzahl an

Hypothesen exponentiell an, wodurch das Verwerfen von unwahrscheinlichen Hypothesen erforderlich wird und eine echtzeitfähige Anwendung des Verfahrens auf eine sehr geringe Anzahl an Objekten beschränkt ist.

Zur signifikanten Verringerung der Berechnungskomplexität verwendet das erstmals in [5] vorgestellte Labeled-Multi-Bernoulli (LMB)-Filter, wie in Abb. 1 dargestellt, zwei verschiedene Repräsentationen der Multi-Objekt-Verteilung: die LMB-Verteilung und die δ -GLMB-Verteilung. Während die im Prädiktionsschritt eingesetzte LMB-Verteilung die Objekte als statistisch unabhängig

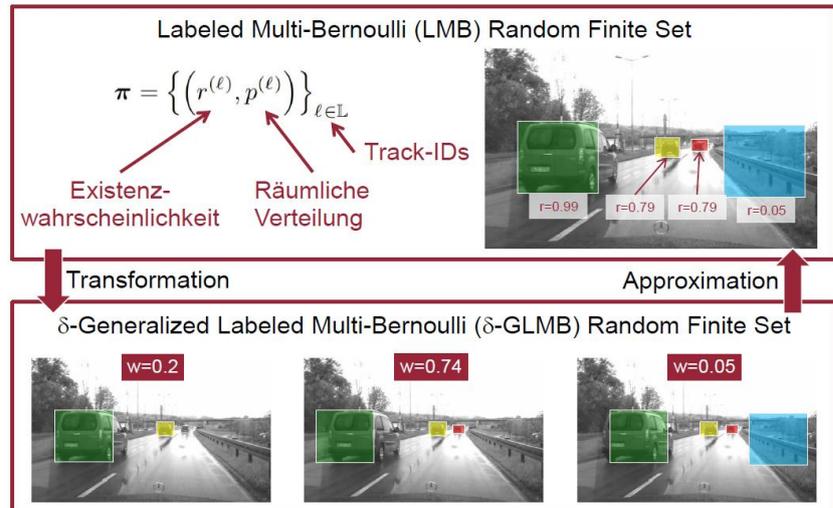


Abbildung 1: Repräsentation mittels δ -GLMB und LMB Random Finite Set

modelliert, ermöglicht die im Innovationsschritt eingesetzte δ -GLMB-Verteilung die Modellierung von statistischen Abhängigkeiten. Eine LMB-Verteilung kann hierbei mathematisch exakt in eine δ -GLMB-Repräsentation überführt werden, während die Rücktransformation eine Approximation der δ -GLMB-Verteilung durch das erste statistische Moment erfordert. Die Verwendung einer LMB-Verteilung für die Prädiktion ermöglicht außerdem eine Partitionierung der Objekte in statistisch unabhängige Gruppen, wodurch die Berechnungskomplexität signifikant verringert wird.

In diesem Beitrag werden die grundlegenden Ideen des Multi-Objekt-Bayes-Filters kurz eingeführt und das neu entwickelte LMB Filter im Detail vorgestellt. Die Schätzergebnisse des LMB Filters werden anhand simulierter sowie realer Sensordaten mit den Ergebnissen des JIPDA-Verfahrens sowie des δ -GLMB-Filters verglichen. Außerdem wird auf die Realisierung einer echtzeitfähigen Implementierung des Filters eingegangen, welche im autonomen Versuchsfahrzeug der Universität Ulm [6] erfolgreich zur Verfolgung aller dynamischen Objekte im Fahrzeugumfeld eingesetzt wird.

Literatur:

- [1] Bar-Shalom, Y.; Willett, P. K. & Tian, X.: "Tracking and Data Fusion", *YBS Publishing*, 2011
- [2] Musicki, D. & Evans, R.: "Joint Integrated Probabilistic Data Association: JIPDA" *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, Vol. 40, S. 1093 – 1099
- [3] Mahler, R.: "Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion", *Artech House Inc., Norwood*, 2007
- [4] Vo, B.-T. & Vo, B.-N.: "Labeled Random Finite Sets and Multi-Object Conjugate Priors", *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, Vol. 61, S. 3460 – 3475
- [5] Reuter, S.; Vo, B.-T.; Vo, B.-N. & Dietmayer, K.: "The Labeled Multi-Bernoulli Filter", *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, Vol. 62, S. 3246 – 3260
- [6] <http://www.uni-ulm.de/in/automatisiertes-fahren>

Hochdynamische Oberleitungs-Emulation eines Pantographenprüfstandes: Modellierungs- und Regelkonzepte

Alexander Schirrer *

Stefan Jakubek **

* Institut für Mechanik und Mechatronik
Technische Universität Wien
Getreidemarkt 9, E325
Tel. +43 1 58801 325521
Fax +43 1 58801 32899
alexander.schirrer@tuwien.ac.at

** Institut für Mechanik und Mechatronik
Technische Universität Wien
Getreidemarkt 9, E325
Tel. +43 1 58801 325510
Fax +43 1 58801 32899
stefan.jakubek@tuwien.ac.at

Schlüsselwörter: Pantographen-Oberleitungs-Interaktion, Power-HiL, absorbierende Randbedingungen, Koordinatentransformation, Optimierung

Im Hochgeschwindigkeits-Zugbetrieb werden extreme Anforderungen an Pantographen-Stromabnehmer gestellt. Deren Hauptaufgabe, den Zug sicher mit elektrischer Energie zu versorgen soll mit minimalem Verschleiß und daher möglichst konstanter, vorgegebener Kontaktkraft erfüllt werden.

Zur Entwicklung aktiv geregelter Pantographen werden von der TU Wien gemeinsam mit SIEMENS Modelle von Pantograph und Oberleitung, Regelkonzepte und Pantographen-Prüfstandslösungen (Abb. 1) erforscht und entwickelt.

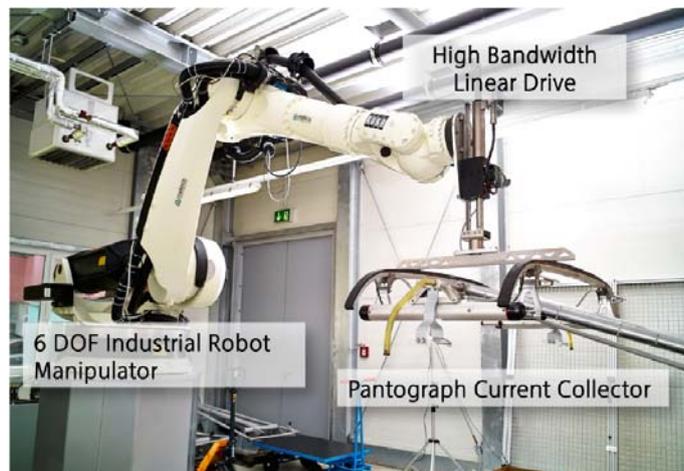


Abbildung 1: Hochdynamischer Pantographenprüfstand mit Oberleitungs-Emulation

Der mechatronische Pantographen-Prüfstand bewerkstelligt dabei die Emulation der Oberleitungsdynamik in Echtzeit. Dazu werden Oberleitungsmodelle verschiedener Komplexität verwendet, und Methoden zur Parametrierung der Modelle aus Messdaten wurden entwickelt [2]. Über die geeignete Kombination von Konzepten der modellprädiktiven Regelung und der mechanischen Impedanzregelung [3] wird es möglich, die komplexe dynamische Interaktion zwischen Pantograph-Prüfling und Oberleitungsmodell im Power-Hardware-in-the-Loop-Fall zu realisieren. Das ermöglicht die Wiederholbarkeit von Testszenarien unter voller Reproduzierbarkeit sowie das virtuelle Testen potentiell gefährlicher Situationen.

Dem dynamischen Oberleitungsmodell wird physikalisch über gekoppelte partielle Differentialgleichungen (Wellengleichung, Erweiterungen der Euler-Bernoulli-Biegebalkengleichung) erstellt. Wellentransport- und Dispersionsphänomene, sowie Teilreflexionen an Hängern sind relevant (Abb. 2) und müssen für die Anwendung abgebildet werden. Das Systemmodell wird weiters auf geeignet mitbewegte Koordinaten transformiert und schließlich diskretisiert. Gemeinsam mit geeigneten

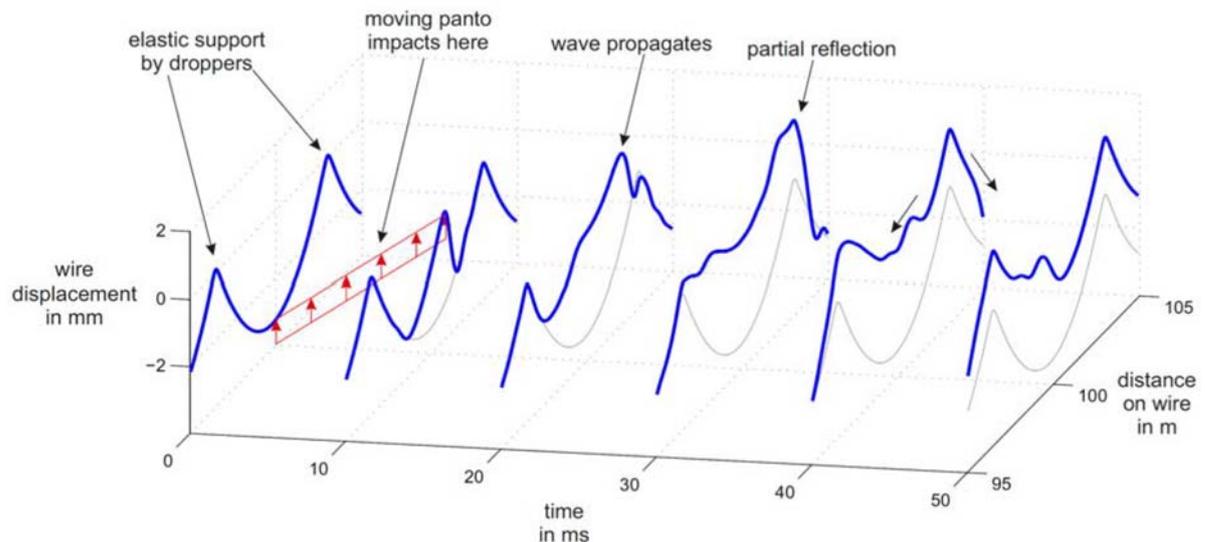


Abbildung 2: Komplexe Fahrdracht-Dynamik zeigt Wellenausbreitung, Teilreflexionen und Leitungsanhub nach einer Anregung durch bewegten Pantographen-Kontakt

absorbierenden Randbedingungen ermöglicht diese Systemstruktur eine signifikante Verkleinerung des Rechengebiets auf die direkte Umgebung des Pantographen-Kontaktpunkts. Derartige Randbedingungen sind im vorliegenden Fall bis dato nicht bekannt. In diesem Beitrag wird daher ein optimierungsbasierter Ansatz zur Generierung absorbierender Randbedingungen für das diskretisierte Problem vorgestellt [1].

Die Optimierungsmethodik basiert auf einem Output-Error-Verfahren, in dem direkt die diskreten Koeffizienten der Realisierung der Randbedingungen optimiert werden, um in geeigneten Testfällen die auftretenden Restreflexionen zu minimieren. Somit können einfache, explizite und stabile Randbedingungen für beliebige Diskretisierungen verteilt-parametrischer Systemdynamik erzeugt und optimiert werden. Weitere, komplexere anwendungsspezifische Probleme, etwa die korrekte Behandlung der Einfahrt der Hänger in das bewegte Rechengebiet, können nun als Rand-Regelungsprobleme behandelt werden.

Literatur:

[1] Alexander Schirrer, Emir Talic, Guilherme Aschauer, Martin Kozek, Stefan Jakubek. Determination of highly absorbing boundary conditions for linear finite difference schemes by multi-objective optimization. *Computational Physics*, 2014. submitted.

[2] Emir Talic, Alexander Schirrer, Martin Kozek, Stefan Jakubek. Multi-objective parameter identification of Euler-Bernoulli beams under axial load. *Sound and Vibration*, 2014 (in press).

[3] Raphael Priesner and Stefan Jakubek. Mechanical impedance control of rotatory test beds. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11):6264–6274, Nov 2014.