

29. Feb. - 2. März 2012

Programm

Kurzfassungen zum Download unter:

www.iosb.fraunhofer.de/?Boppard

Mittwoch, 29. Februar 2012

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

Donnerstag, 1. März 2012

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

	Haupttagungsraum im EG	Tagungsraum im 3. OG
08:30 – 10:00	Eigenschaften, Analyse und Entwurf nichtlinearer und verteilt parametrischer Systeme Sitzungsleitung: Prof. G. Roppenecker	Modellierung und modellbasierte Verfahren in der Anwendung Sitzungsleitung: Prof. W. Schumacher
08:30 – 09:00	Zur generischen Beobachtbarkeit linearer und nichtlinearer Systeme <i>Christoph Hartung (Institut für Steuer- und Regelungstechnik, Universität BW München, Prof. Svaricek, Gr. 22)</i>	Modellierung und Identifikation von Temperaturfeldern in Multizonenöfen zur Untersuchung von Diffusionsprozessen <i>Dirk Bräuer (Institut für Automatisierungstechnik, TU Freiberg, Prof. Rehkopf, Gr. 10)</i>
09:00 – 09:30	Stabilitätsuntersuchung und Reglerauslegung von lokalen Modellnetzwerken <i>Christian Mayr (Institut für Mechanik und Mechatronik, TU Wien, Prof. Jakubek, Gr. 29)</i>	Modellbasiertes Regelkonzept für LKW-Doppelkupplungsgetriebe <i>Tomas Szabo (Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Prof. Dietmayer, Gr. 28)</i>
09:30 – 10:00	Flachheitsbasierte Zustandsregler für Systeme mit örtlich verteilten Parametern <i>Frank Woittennek (Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, TU Dresden, Prof. Röbenack, Gr. 9)</i>	Modellbasierte Kompensation der Hysterese in der Kraftcharakteristik von pneumatischen Muskeln <i>Dominik Schindele (Lehrstuhl für Mechatronik, Universität Rostock, Prof. Aschemann, Gr. 24)</i>

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

29. Feb. - 2. März 2012

10:30 – 12:00	Analyse und Entwurf digital vernetzter Steuerungs- und Regelungssysteme Sitzungsleitung: Prof. P. Göhner	Bildbasierte Verfahren Sitzungsleitung: Prof. A. Gräser
10:30 – 11:00	Verteilte prädiktive Regelung mit Kommunikation für verkoppelte Systeme <i>Dominic Groß (Regelungs- und Systemtheorie, Universität Kassel, Prof. Stursberg, Gr. 19)</i>	Einsatz eines RGB-D-Sensors zur schwingungsgedämpften Positionierung eines glied-elastischen Roboterarms <i>Jörn Malzahn (Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, TU Dortmund, Prof. Bertram, Gr. 8)</i>
11:00 – 11:30	Robuste Regelung von Multiagentensystemen mit zeitvarianten Kommunikations-Topologien und -Totzeiten <i>Andrey Popov (Institut für Regelungstechnik, TU Hamburg-Harburg, Prof. Werner, Gr. 13)</i>	Multisensor Konturverfolgung an nachgiebigen Objekten <i>Heiko Koch (Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Hochschule Darmstadt, Prof. Suchý (TU Chemnitz), Gr. 6)</i>
11:30 – 12:00	Effiziente Modellierung und Simulation vernetzter Automatisierungssysteme <i>Liu Liu (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, Universität d. Saarlandes, Prof. Frey, Gr. 25)</i>	Hemisphärische Beleuchtungsmuster für die automatische Sichtprüfung <i>Robin Gruna (Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, KIT, Prof. Beyerer (Fraunhofer-IOSB), Gr. 18)</i>

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

14:30 – 16:00	Aspekte des automatisierungstechnischen Engineerings und ereignisdiskrete Systeme Sitzungsleitung: Prof. C. Diedrich	Spezielle Anwendungen Sitzungsleitung: Frau Prof. C. Tarin
14:30 – 15:00	Formale Verifikation von SPS-Programmen <i>Sebastian Biallas (Lehrstuhl Informatik, RWTH Aachen, Prof. Kowalewski, Gr. 1)</i>	Mehrgrößenregelung von Nanopositionier- und Messmaschinen <i>Stephan Zschäck (FG Systemanalyse, TU Ilmenau, Prof. Ament, Gr. 15)</i>
15:00 – 15:30	Integration von Reglern in eine UML-basierte Entwicklungsumgebung für Speicherprogrammierbare Steuerungen <i>Gülden Bayrak (Lehrstuhl Automatisierung und Informationssysteme, TU München, Prof. Vogel-Heuser, Gr. 21)</i>	Qualitätsregelung für den Laser-Jet-Prozess <i>Peiran Zhang (BIMAQ, Universität Bremen, Prof. Goch, Gr. 5)</i>
15:30 – 16:00	Zur Berechnung supremaler Teilsprachen für die ereignisdiskrete Regelung <i>Christine Baier (Lehrstuhl f. Regelungstechnik, Universität Erlangen, Prof. Moor, Gr. 12)</i>	Entwicklung eines Luftschiffes zu einem fliegenden Roboter <i>Pavol Bahnik (Lehrgebiet Prozesssteuerung und Regelungstechnik, FernUniversität Hagen, Prof. Hoyer/Prof. Gerke, Gr. 30)</i>

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

16:30 – 17:30	Plenarvortrag im Haupttagungsraum EG Cyber Physical Systems – Eine Perspektive der Informatik <i>Prof. Dr. rer. nat. Franz Josef Rammig, Fachgruppe Entwurf paralleler Systeme, Universität Paderborn</i>
----------------------	--

18:30 Abendessen im Rheinhotel Bellevue

Freitag, 2. März 2012

08:30 – 10:00	Methodischer Regelungs- und Steuerungsentwurf Sitzungsleitung: Prof. H. Röck	Fehlererkennung, Fehlertoleranz und reales Regelungsverhalten Sitzungsleitung: Prof. U. Maier
08:30 – 09:00	Tropische Algebren und Regelung von industriellen High-Throughput Screening Systemen <i>Thomas Brunsch (Fachgebiet Regelungssysteme, TU Berlin, Prof. Raisch (MPI Magdeburg), Gr. 2)</i>	Datenbasierter Entwurf fehlertoleranter Regelungssysteme <i>Adel Haghani (Automatisierungstechnik und komplexe Systeme, Universität Duisburg-Essen, Prof. Ding, Gr. 11)</i>
09:00 – 09:30	Lineare und nichtlineare Ansätze zur Stabilisierung partikelbildender Prozesse in Wirbelschichten <i>Stefan Palis (Institut für Automatisierungstechnik, Universität Magdeburg, Prof. Kienle (MPI Magdeburg), Gr. 20)</i>	Eine objektorientierte Methode zur modellbasierten Fehlererkennung und -isolation für komplexe Systeme <i>Stefan Simon (Lehrstuhl für Regelungssysteme, TU Kaiserslautern, Prof. Liu, Gr. 16)</i>
09:30 – 10:00	Vorsteuerung der longitudinalen Eigendynamik von Balken auf Basis des örtlichen Eigenwertproblems <i>Silke Klose (rtm/IAT, TU Darmstadt, Prof. Konigorski, Gr. 7)</i>	Strukturvariable Anti-Windup-Methoden mittels implizierter Ljapunov Funktionen <i>Andreas Ortseifen (Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik, TU Darmstadt, Prof. Adamy, Gr. 7)</i>

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

10:30 – 12:00	Optimierungsbasierte Steuerung und Regelung nichtlinearer und hybrider Systeme Sitzungsleitung: Prof. J. Reger	Verkehrstechnische Anwendungen Sitzungsleitung: Prof. K. Lemmer
10:30 – 11:00	Optimalsteuerung nichtlinearer Systeme mittels der Differentiellen Dynamischen Programmierung <i>Shaady Khatib (Regelungstechnik und Mechatronik, Universität Paderborn, Prof. Trächtler, Gr. 23)</i>	Modellierung kooperativen Straßenverkehrs mit Petrinetzen <i>Matthias Hübner (Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig, Prof. Schnieder, Gr. 4)</i>
11:00 – 11:30	Bewegungsplanung und Sicherheitsbewertung in dynamischen Umgebungen <i>Daniel Althoff (Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, Prof. Buss, Gr. 21)</i>	Trajektorien-generierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien <i>Moritz Werling (Institut für Angewandte Informatik/Automatisierungstechnik, KIT/ BMW Group Forschung u. Technik, Prof. Bretthauer, Gr. 17)</i>
11:30 – 12:00	Explizite modellprädiktive Regelung nichtlinearer Systeme <i>Moritz Schulze Darup (Regelungstechnik und Systemtheorie, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Mönnigmann, Gr. 3)</i>	Energiesparendes Fahren durch Fahrerassistenz im Straßenbahnbetrieb <i>Christian Gassel (Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, TU Dresden, Prof. Krimmling, Gr. 10)</i>

12:00 – 12:45 Abschluss im Haupttagungsraum EG

Preisverleihung durch einen Vertreter der NAMUR – Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie

Aufruf zum Kongress Automation 2012

Aufruf für Boppard 2013

12:45 - 13:45 Mittagessen im Rheinhotel Bellevue

13:45 Ende des Kolloquiums

Zur generischen Beobachtbarkeit linearer und nichtlinearer Systeme

Christoph Hartung*

* Institut für Steuer- und Regelungstechnik
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg
Tel: 0049 (0)89 6004 2875
Tel: 0049 (0)89 6004 4565
christoph.hartung@unibw.de

Ferdinand Svaricek **

** Institut für Steuer- und Regelungstechnik
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg
Tel: 0049 (0)89 6004 2077
Tel: 0049 (0)89 6004 4565
ferdinand.svaricek@unibw.de

Schlüsselwörter: Beobachtbarkeit, strukturelle Eigenschaften, Graphentheorie

Die Analyse der Beobachtbarkeit eines Zustandsgrößenmodells ist der erste Schritt auf dem Weg zur Schätzung nicht gemessener Zustandsgrößen. Falls ein lineares Modell diese strukturelle Eigenschaft der Beobachtbarkeit nicht besitzt, so ist es nicht möglich einen funktionsfähigen Zustandsschätzer mit diesem Modell und der vorhandenen Sensorkonfiguration zu entwerfen. Für lineare, zeitinvariante Mehrgrößensysteme gibt es bereits seit den 1960er Jahren verschiedene hinreichende und notwendige Bedingungen, die anhand der Systemmatrix und der Ausgangsmatrix des Modells überprüft werden können [1,2].

In den meisten Zustandsgrößenmodellen technischer und physikalischer Systeme sind die Parameter allerdings nicht exakt bekannt. Zudem müssen in den Kriterien die Einträge der Matrizen oft vielfach multipliziert werden, sodass eine numerische Berechnung der Steuer- und Beobachtbarkeit gewisse Unsicherheiten mit sich bringt [3]. Daher wurde in den 1970er Jahren in [4] vorgeschlagen, die Struktur dieser Modelle zu untersuchen, indem die Einträge der numerischen Matrizen durch Nullen und Einsen ersetzt werden. Mit einer Eins wird dabei eine Verbindung zwischen den jeweiligen Systemgrößen dargestellt, während durch eine Null ausgedrückt wird, dass keine Verbindung existiert. Die daraus entstehenden Strukturmodelle können mit vergleichsweise wenig Rechenaufwand auf ihre generischen Eigenschaften mit Hilfe der Graphentheorie untersucht werden [5-8].

In den vergangenen Jahren hat dieser graphentheoretische Ansatz zur Beschreibung und Analyse dynamischer Systeme auch im Bereich „Networked Control und Multi-Agent Systems“ neue Beachtung gefunden [9-14].

In dem Vortrag sollen die graphentheoretischen Definitionen und Bedingungen der Beobachtbarkeit vorgestellt und erläutert werden. Der Schwerpunkt wird dabei auf den Bedingungen für die „strukturelle Beobachtbarkeit“ liegen, welche notwendig für die Beobachtbarkeit linearer Systeme ist. Hier können also klare Aussagen über den Verlust der Beobachtbarkeit anhand der Struktur des linearen Modells getroffen werden. Des Weiteren wird untersucht, inwieweit diese Bedingungen auch für nichtlineare Systeme notwendig sind.

Literatur:

- [1] Kalman, R.: On the general theory of control systems. In *Proc. 1st IFAC Congress*, 1960, pp. 481-492.
- [2] Hautus, M.L.J.: Controllability and observability conditions of linear autonomous systems, *Indagationes Mathematicae*, Vol. 72, 1969, pp. 443-448.
- [3] Svaricek, F.: Zuverlässige numerische Analyse linearer Regelungssysteme, *Teubner Verlag*, 1995.
- [4] Lin, C.T.: Structural controllability, In *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 19, 1974, pp. 201-208.
- [5] Reinschke, K.J.: Multivariable control: a graph theoretic approach, *Springer-Verlag*, 1988.
- [6] Wend, H.D.: Strukturelle Analyse linearer Regelungssysteme, *Oldenbourg Verlag*, 1993.
- [7] Svaricek, F.: A graph-theoretic approach for the investigation of the observability of bilinear systems, In *Proc. 12th IFAC World Congress*, Vol. 4, 1993, pp. 351-354.
- [8] Murota, K.: Matrices and Matroids for Systems Analysis, *Springer Verlag*, 2009.
- [9] Mesbahi, M. and Egerstedt, M.: Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks, *Princeton University Press*, 2010.
- [10] Svaricek, F. and Jarczyk, J.C. and Alt, B.: Strukturelle und streng strukturelle Steuerbarkeit: Übersicht und neue Ergebnisse, *at-Automatisierungstechnik*, Vol. 59, 2011, pp. 329-339.
- [11] Boukhobza, T. and Hamelin, F.: Observability and measurement allocation analysis for networked systems, In *Proc. of the 1st FAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems*, Venedig, Italien, 2009.
- [12] Boukhobza, T and Hamelin, F.: Observability analysis for networked control systems: A graph theoretic approach. In *Proc. of the 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, 2008.
- [13] Liu, A.; Lin, H. and Chen, B.M.: A graph-theoretic characterization of structural controllability for multi-agent system with switching topology, In *Proc. of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 7012–7017, Shanghai, P. R. China, 2009.
- [14] Partovi, A; Lin, H. and Ji, Z.: Structural controllability of high order dynamic multi-agent systems. In *Proc. of the 2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 327–332, Singapore, 2010.

Stabilitätsuntersuchung und Reglerauslegung von lokalen Modellnetzwerken

Christian Mayr *

* Christian Doppler Labor
für modellbasierte Kalibriermethoden
am Institut für Mechanik und Mechatronik
Technische Universität Wien
Wiedner Hauptstrasse 8-10/E325-A5
+43 (0) 1 58801 325517
+43 (0) 1 58801 32899
christian.mayr@tuwien.ac.at

Stefan Jakubek **

** Christian Doppler Labor
für modellbasierte Kalibriermethoden
am Institut für Mechanik und Mechatronik
Technische Universität Wien
Wiedner Hauptstrasse 8-10/E325-A5
+43 (0) 1 58801 325510
+43 (0) 1 58801 32899
stefan.jakubek@tuwien.ac.at

Schlüsselwörter: Lokale Modellnetzwerke, Stabilität, Lyapunov-Funktion

Dieser Beitrag beschreibt Verfahren zur Stabilitätsanalyse und Reglerauslegung von dynamischen lokalen Modellnetzwerken welche durch nichtlineare Systemidentifikation generiert werden.

Lokale Modellnetzwerke sind ein bewährter Ansatz, um verschiedenste nichtlineare Systeme zu approximieren. Die Approximation basiert auf einer Partitionierung der Nichtlinearitäten in Teilgebiete, welche typischerweise durch lineare Teilmodelle dargestellt werden, [1]. Die Parametrierung und Partitionierung solcher lokaler Modellnetzwerke basiert auf gemessenen Ein- und Ausgangsdaten des unbekanntem nichtlinearen Systems.

Ein wesentlicher Aspekt bei dynamischen lokalen Modellnetzwerken ist deren Stabilitätsnachweis. Sogar wenn alle linear-dynamischen Teilsysteme für sich stabil sind, kann durch deren Interaktion das Gesamtsystem instabil werden. Klassische Methoden der linearen Systemtheorie können nur in Spezialfällen eingesetzt werden (z.B. Wurzelortskurven). Daher wird im Allgemeinen der Stabilitätsnachweis von lokalen Modellnetzwerken mittels Lyapunov-Funktionen durchgeführt. Bei den resultierenden Kriterien handelt es sich üblicherweise um lineare Matrixungleichungen (LMUs). Um open-loop Stabilität von lokalen Modellnetzwerken nachzuweisen, werden häufig die drei folgenden Ansätze verwendet:

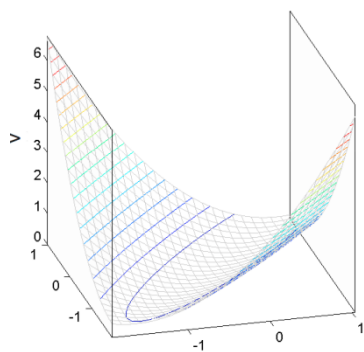


Abbildung 1: Common Quadratic Lyapunov Ansatz

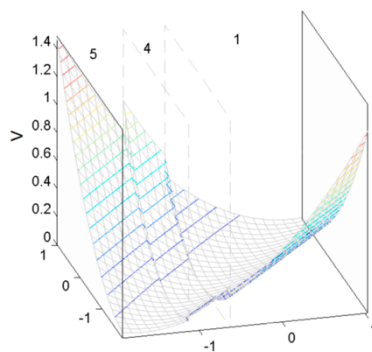


Abbildung 2: Piecewise Quadratic Lyapunov Ansatz

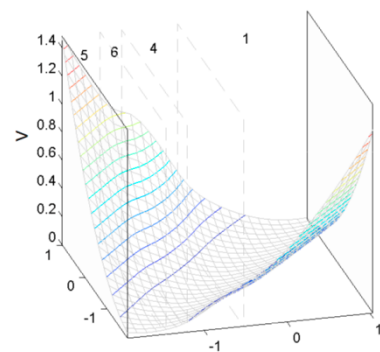


Abbildung 3: Fuzzy Lyapunov Ansatz

- *Common Quadratic Lyapunov Ansatz* [2]: Bei diesem Ansatz muss *eine* quadratische Lyapunov Funktion für *alle* lokalen Teilmodelle gefunden werden, siehe *Abbildung 1*.
- *Piecewise Quadratic Lyapunov Ansatz* [3]: Bei diesem Ansatz wird für jedes lokale Teilmodell eine quadratische Lyapunov Funktion verwendet. Die Grenzen der Funktionen werden über die Gültigkeitsbereiche der jeweiligen Teilmodelle definiert. Die lokalen Lyapunov-Funktionen sind durch die auftretenden Modellübergänge untereinander verbunden. Die globale Lyapunov Funktion ist *stückweise quadratisch* und nicht überall stetig, siehe *Abbildung 2*.
- *Fuzzy Lyapunov Ansatz* [4]: Ähnlich wie beim piecewise quadratic Lyapunov Ansatz besitzen alle Teilmodelle eigene quadratische Lyapunov-Funktionen, welche durch die auftretenden Modellübergänge untereinander verbunden sind. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die globale Lyapunov Funktion eine gewichtete Aggregation der lokalen Funktionen darstellt, wobei die Gewichtung durch die Gültigkeitsfunktionen erfolgt. Daraus resultiert eine *nichtquadratische* Lyapunov Funktion, siehe *Abbildung 3*.

Die Methode nach Lyapunov liefert bei gegebener Struktur der Lyapunov-Funktion hinreichende, jedoch nicht notwendige Bedingungen für Stabilität. Dies führt je nach Ansatz zu unterschiedlich konservativen Resultaten.

Um die Unterschiede dieser Ansätze quantitativ zu erfassen, wurden diese um eine Abklingkonstante erweitert, welche auch als Auslegungsparameter beim Reglerdesign verwendet werden kann. In diesem Zusammenhang wird eine neue Methode zur Parametrierung nichtlinearer PID Regler vorgestellt. Um globale Stabilität zu garantieren, werden hier Lyapunov Ansätze für den geschlossenen Regelkreis verwendet, welche üblicherweise zu bilinearen Matrixungleichungen (BMU) führen, [5]. Bei diesen Ansätzen müssen die Reglerparameter und die Lyapunov Funktion in einem Schritt bestimmt werden. Die größte Herausforderung besteht darin, dass durch die Form der Rückführmatrix keine Transformation der BMU in eine LMU möglich ist. Deshalb wird eine iterative Methode verwendet, um global stabile PID Regler für lokale Modellnetzwerke auszulegen. Die Methode basiert auf einem beliebigen initialen Reglerdesign mit anschließenden iterativen Lyapunov Kriterium (iLMI). Anhand eines Beispiels wird die Effektivität dieser Methode demonstriert.

Literatur:

- [1] O. Nelles, Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Systems, 2001.
- [2] K. Tanaka und M. Sugeno, Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems, Fuzzy Sets and Systems, vol. 45, no. 2, pp. 135-156, 1992
- [3] C. Mayr, C. Hametner and S. Jakubek, Piecewise Quadratic Stability Analysis for Local Model Networks, Proceedings of the 2011 IEEE Multi-conference on System and Control, 2011.
- [4] C. Mayr, C. Hametner and S. Jakubek, Relaxed Fuzzy Lyapunov Approach for Dynamic Local Model Networks, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2011
- [5] E. Kim and H. Lee, New Approaches to Relax Quadratic Stability Condition of Fuzzy Control Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 8, no. 5, pp. 523-534, 2000.

Flachheitsbasierte Zustandsregler für Systeme mit örtlich verteilten Parametern

Frank Woittennek

Technische Universität Dresden
Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
01062 Dresden
Telefon: +49 351 463 34311
Fax: +49 351 463 37281
E-Mail: frank.woittennek@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: System mit örtlich verteilten Parametern, hyperbolische partielle Differentialgleichung, Flachheit, Zustandsrückführung

Der Vortrag beschäftigt sich mit dem flachheitsbasierten Entwurf von Zustandsreglern für lineare Systeme mit örtlich verteilten Parametern in einer unabhängigen Ortsvariablen. Im Mittelpunkt stehen dabei Modelle, die mit Hilfe hyperbolischer partieller Differentialgleichungen beschrieben werden.

Einige wesentliche Grundideen der vorgestellten Ansätze wurden bereits in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts entwickelt [1]: Einfache hyperbolische Randwertaufgaben können mit Hilfe der Methode der Charakteristiken in Totzeitgleichungen überführt werden. Im Rahmen des flachheitsbasierten Zugangs zur Steuerung und Regelung von Systemen mit örtlich verteilten Parametern wurden diese Ideen aufgegriffen und weiterentwickelt [5, 6]. Im Mittelpunkt stand dabei insbesondere die eindimensionale lineare Wellengleichung: In Abhängigkeit von den konkret gestellten Randbedingungen übernehmen dabei jeweils spezielle Randwerte die Rolle des flachen Ausgangs, für sie können Trajektorien frei gewählt werden. Die zeitlichen Verläufe der übrigen Größen ergeben sich im Anschluss durch Berücksichtigung von Totzeiten und Prädiktionen aus der Trajektorie des flachen Ausgangs. Auch dynamische Randbedingungen, die auch als Kopplung des verteiltparametrischen mit einem konzentriertparametrischen System interpretiert werden können, lassen sich problemlos in diesem Rahmen behandeln. Statt Totzeitgleichungen erhält man dann Totzeit-Differentialgleichungen. Im Falle allgemeinerer hyperbolischer Gleichungen zweiter Ordnung können dabei zusätzlich auch verteilte Totzeiten und Prädiktionen auftreten. In Kombination mit den in [10, 11] erhaltenen algebraischen Ergebnissen lassen sich auch Systeme von über den Rand verkoppelten partiellen Differentialgleichungen in analoger Weise analysieren. Die beschriebenen Ergebnisse wurden in der Vergangenheit vor allem für den Steuerungsentwurf genutzt, wobei sich der flachheitsbasierte Zugang auch für eine Reihe weiterer linearer und nichtlinearer verteiltparametrischer Modelle als äußerst nützlich erwiesen hat [2–4, 8].

Neben dem Steuerungsentwurf wurden in [6] auch Regelungsalgorithmen vorgeschlagen, die die Flachheit des betrachteten Modells explizit ausnutzen und auf einer Prädiktion der Trajektorie des flachen Ausgangs basieren. Aktuelle Ergebnisse zur Zustandssteuerbarkeit verteiltparametrischer Systeme [9] erlauben eine interessante Neuinterpretation dieser Regelungsalgorithmen als flachheitsbasierte Zustandsrückführungen. Zur Parametrierung der Eingangsgröße durch den flachen Ausgang wird dabei ein Zustand eingeführt. Die zugehörige Zustandsdarstellung entspricht dann der

aus der Theorie endlichdimensionaler linearer Systeme bekannten Regelungsnormalform, die um ein einfaches Transportsystem ergänzt wird (vgl. auch [7]). Die Berechnung einer Zustandsrückführung zu einer gewünschten stabilen Folgefehlerdynamik ist in diesen Koordinaten sehr einfach. Um diese Rückführung in den originalen physikalischen Koordinaten anzugeben, wird eine Zustandstransformation genutzt, die sich unmittelbar aus der Parametrierung des Originalzustands durch den flachen Ausgang ergibt. Auch für die Implementierung der flachheitsbasierten Regelgesetze mit Hilfe des Prinzips der späten Approximation (late lumping) ergeben sich durch die neue Sichtweise interessante Möglichkeiten.

Literatur

- [1] K. L. Cooke and D. W. Krumme. Differential-difference equations and nonlinear initial-boundary value problems for linear hyperbolic partial differential equations. *J. Math. Anal. Appl.*, 24:372–387, 1968.
- [2] T. Knüppel, F. Woittennek, and J. Rudolph. Flachheitsbasierte Trajektorienplanung für semilineare hyperbolische Systeme mit Randeingriff. *at – Automatisierungstechnik*, 58(3):117–127, 2010.
- [3] A. F. Lynch and J. Rudolph. Flatness-based boundary control of a class of quasi-linear parabolic distributed parameter systems. *Internat. J. Control*, 75(15):1219–1230, 2002.
- [4] T. Meurer and A. Kugi. Trajectory planning for boundary controlled parabolic pdes with varying parameters on higher-dimensional spatial domains. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(8):1854–1868, 2009.
- [5] H. Mounier. *Propriétés structurelles des systèmes linéaires à retards : aspects théoriques et pratiques*. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, Orsay, 1995.
- [6] H. Mounier and J. Rudolph. Flatness based control of nonlinear delay systems: A chemical reactor example. *Internat. J. Control*, 71:871–890, 1998.
- [7] D. L. Russell. Neutral FDE canonical representations of hyperbolic systems. *Journal of Integral Equations and Applications*, 3(1):129–166, 1991.
- [8] F. Woittennek. *Beiträge zum Steuerungsentwurf für lineare, örtlich verteilte Systeme mit konzentrierten Stelleingriffen*. Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik. Shaker Verlag, Aachen, 2007.
- [9] F. Woittennek. On flatness and controllability of simple hyperbolic distributed parameter systems. In *Proc. 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, 2011.
- [10] F. Woittennek and H. Mounier. Controllability of networks of spatially one-dimensional second order p.d.e. – an algebraic approach. *SIAM J. Control Optim.*, 48(6):3882–3902, 2010.
- [11] F. Woittennek and H. Mounier. Flachheit und Steuerbarkeit einer Klasse von Netzwerken örtlich verteilter Systeme. *at – Automatisierungstechnik*, 58(3):129–150, 2010.

Modellierung und Identifikation von Temperaturfeldern in Multizonenöfen zur Untersuchung von Diffusionsprozessen

Dirk Bräuer*

* Institut für Automatisierungstechnik
TU Bergakademie Freiberg
Lessingstraße 45, 09596 Freiberg
03731 - 39 4046
03731 - 39 3481
Dirk.Braeuer@aut.tu-freiberg.de

Andreas Rehkopf**

** Institut für Automatisierungstechnik
TU Bergakademie Freiberg
Lessingstraße 45, 09596 Freiberg
03731 - 39 3291
03731 - 39 3481
Andreas.Rehkopf@aut.tu-freiberg.de

Schlüsselwörter: Diffusion, Temperaturfeld, Modellbildung, Identifikation

Diffusionsprozesse sind die Basis vieler aktueller Forschungspunkte der Materialwissenschaften. Eine genaue Kenntnis der Vorgänge und der damit verbundenen Parameter (vor allem des Diffusionskoeffizienten) ist die Grundlage für die Entwicklung moderner Werkstoffe. Eine besondere Bedeutung kommt dabei aufgrund der vielfältigen industriellen Verwendungsmöglichkeiten den Diffusionsprozessen in Metall- und Halbleiterschmelzen zu. [1]

Eine häufig angewandte und exakte Methode zur Bestimmung der temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten in Schmelzen ist die Lange-Kapillar-Methode in Kombination mit der Scherzellentechnologie in Multizonenöfen. Sie ermöglicht durch das "Einfrieren" des Diffusionsprofils eine genaue Festlegung der Diffusionszeit und damit eine exakte Parameterbestimmung. [1, 2, 5]

Im Gegensatz zu Anlagen zur Halbleitereinkristallzüchtung (siehe [3, 4, 6, 7]) gestattet der Aufbau der Versuchsanlage die Einbringung von Temperatursensoren in Probennähe. Damit wird der Übergang von der eindimensionalen Betrachtung ([3, 6]) zu einer geometrisch höherdimensionalen Modellierung ermöglicht.

In dem vorliegenden Beitrag wird basierend auf den Wärmeleitungsvorgängen ein Zustandsraummodell der rotationssymmetrischen Anlage vorgestellt. Basis hierfür ist die Zerlegung des Ausgangssystems in einzelne Teilgebiete mit konstanten Parametern. Für die entsprechenden Teile werden separate Zustandsraummodelle aufgestellt und für die Abbildung des Gesamtverhaltens zusammengefügt. [5]

Ergebnis ist ein hochdimensionales Modell mit einer vergleichsweise geringen Anzahl unbekannter Parameter. So liegen im Fall der Diffusionsanlage (bei einer Gitterweite von 2mm) knapp 11000 Zustände bei 13 unbekanntem Stoffparametern vor.

Im Weiteren liefert der Beitrag einen Ansatz zur Identifikation dieser Parameter. Dies erfolgt getrennt für das stationäre Temperaturfeld und einen mit Hilfe von PRB-Signalen erzeugten instationären Temperaturverlauf. Dabei zeigt sich, dass die Güte der Identifikation maßgeblich von der Anzahl der Teilgebiete und damit von der Parameteranzahl abhängt. Die Ergebnisse bleiben bei der Wahl von sechs verschiedenen Materialien hinter denen der Einzelzonenmodellierung (siehe [3, 4, 6]) zurück. Jedoch bietet das Modell eine deutlich größere Flexibilität bei Aufbau und Analyse der Anlage. So sind eine freie Sensorpositionierung und eine Auswertung zusätzlicher Temperaturen möglich.

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau des Diffusionsofens mit den 15 aus der Zerlegung resultierenden Teilgebieten. Gleiche Materialien sind durch gleiche

Schraffur der Teile dargestellt. Der Anordnung der Thermoelemente lässt sich entnehmen, dass eine direkte Zuordnung der Heizer zu den Sensoren, wie sie in [3, 6] notwendig ist, nicht erfolgen kann. Beispielsweise liegt der Sensor *Probe 3* axial genau zwischen den Heizern der zweiten und dritten Zone.

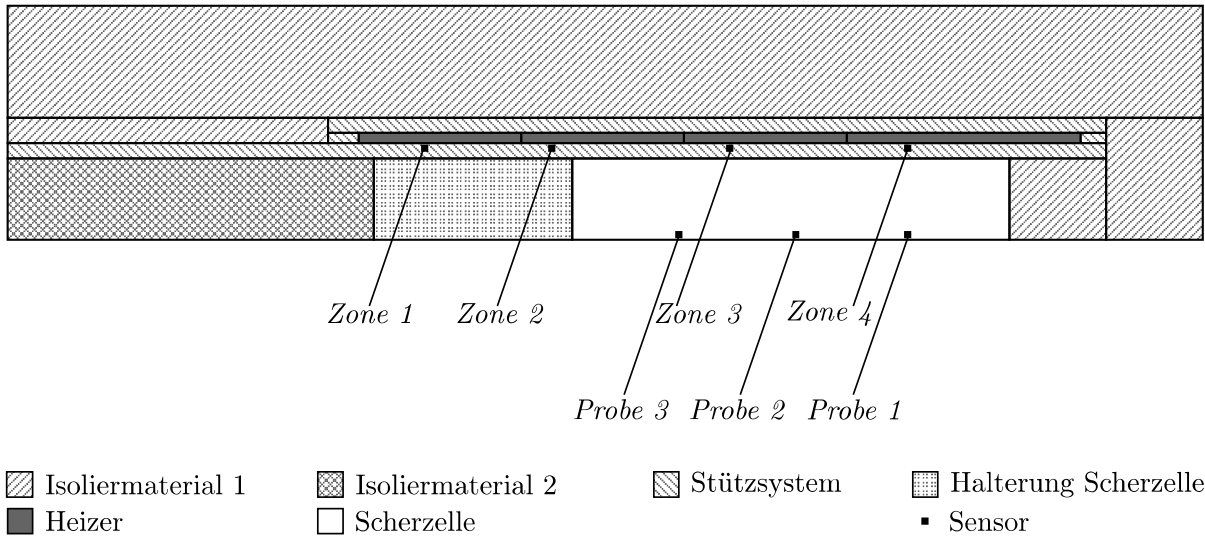


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

Literatur:

- [1] Masaki, Tadahiko; Fukazawa, Tomoharu; Watanabe, Yuki; Kaneko, Minoru; Yoda, Shinichi; Itami, Toshi: Measurement of diffusion coefficients of Au in liquid Ag with the shear cell technique. *Journal of Non-Crystalline Solids* 353, 2007
- [2] Griesche, Axel; Macht, Michael-Peter; Froberg, Günter: Diffusion in Multicomponent Metallic Melts Near the Melting Temperature. Weinheim: Wiley-VCH, 2008
- [3] Hermann, Konstantin; Rehkopf, Andreas; Sauermann, Hartmut: Betrachtungen zur Identifikation einer Gradient-Freeze-Anlage zur Einkristallzüchtung. *at - Automatisierungstechnik* 54, S. 566–573, 2006
- [4] Bräuer, Dirk; Rehkopf, Andreas: Modellbildung und Simulation von Mehrzonenöfen zur Einkristallzüchtung unter automatisierungstechnischen Aspekten. ASIM 2009 - 20. Symposium Simulationstechnik. Shaker Verlag, 2009
- [5] Bräuer, Dirk; Rehkopf, Andreas: Modellierung des thermischen Verhaltens einer Diffusionsanlage mit Hilfe von Gebietszerlegungsverfahren in Hinblick auf Regelung. Tagungsband GMA FA 1.30 2010. Wien, 2010
- [6] Hermann, Konstantin: Untersuchungen zur optimalen Regelung von Mehrzonenrohröfen zur Einkristallzüchtung, TU Freiberg, Dissertation, 2011
- [7] Bräuer, Dirk; Rehkopf, Andreas: Online Management and Control System for growing of monocrystal semiconductor materials in multi-zone furnaces. Tagungsband ETFA 2008. Hamburg, 2008

Modellbasiertes Regelkonzept für LKW-Doppelkupplungsgetriebe

Tomas Szabo

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm
Albert-Einstein-Allee 41
Tel.: +49 – (0)731 – 5026323
Fax: +49 – (0)731 – 5026301
tomas.szabo@uni-ulm.de

Klaus Dietmayer

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm
Albert-Einstein-Allee 41
Tel.: +49 – (0)731 – 5026302
Fax: +49 – (0)731 – 5026301
tomas.szabo@uni-ulm.de

Schlüsselwörter: nichtlineare Systeme mit Totzeiten, flachheitsbasierte Vorsteuerung, modellprädiktive Regelung, Laguerre Polynome

Im Zuge der evolutionären Weiterentwicklung von LKW-Getrieben für den Fernverkehr, bei der neben der Erhöhung der Sicherheit und des Komforts vor allem die weitere Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs im Mittelpunkt steht, werden derzeit auch Konzepte mit Doppelkupplungen untersucht. Doppelkupplungsgetriebe (DKG) bieten den Vorteil des zugkraftunterbrechungsfreien Schaltens der Gänge, was zu neuen Abstimmungen der Getriebe genutzt werden kann.

Obwohl DKG im PKW-Bereich bereits seit 2003 in Serie verfügbar sind, hängt die Entwicklung im LKW-Bereich noch hinterher. Gründe hierfür sind vor allem die sich wesentlich unterscheidende Triebstrangdynamik, Laufleistung und maßgeblich die Verwendung von trocken laufenden Reibkupplungen mit pneumatischer Aktorik.

In diesem Vortrag wird ein Gesamtregelkonzept vorgestellt, mit dem Lastschaltungen mit LKW-DKG durchgeführt werden können. Zur Regelung der Kupplungen wird eine flachheitsbasierte Vorsteuerung mit stabilisierender Regelung verwendet. Das hierfür verwendete Modell wird selbsttätig eingelernt und zur Laufzeit adaptiert. Zusätzlich wird die Vorsteuerung verwendet, um die Totzeiten der Kupplungen zu kompensieren, in dem die Stellgrößen zeitlich voraus auf die Strecke gegeben werden. Zur Prädiktion des zukünftigen Kupplungssollweges wird ein modellprädiktiver Regelansatz für den Triebstrang vorgestellt. Dieser Ansatz approximiert den prädizierten Stellgrößenverlauf mit Hilfe von Laguerre-Polynomen und hat neben einer deutlichen Reduzierung der Dimension des Optimierungsproblems den Vorteil, dass zusätzlich die zeitlichen Ableitungen des Stellgrößenverlaufs analytisch aus der Lösung bestimmt werden können. Abschließend werden Ergebnisse gezeigt, die mit diesem Gesamtregelkonzept am institutseigenen Prüfstand erzielt wurden.

Literatur:

- [1] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. Springer, 2009.
- [2] J. Rudolph, *Flachheit: Eine nützliche Eigenschaft auch für Systeme mit Totzeiten*, Automatisierungstechnik: Vol. 53, Issue 4-5, pp. 178-188, 2005.

Modellbasierte Kompensation der Hysterese in der Kraftcharakteristik von pneumatischen Muskeln

Dominik Schindele*

* Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock
Tel.: 0381/498-9218
Fax: 0381/498-9092
Dominik.Schindele@uni-rostock.de

Harald Aschemann **

** Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock
Tel.: 0381/498-9210
Fax: 0381/498-9092
Harald.Aschemann@uni-rostock.de

Schlüsselwörter: Pneumatische Muskeln, Hysterese, Identifikation, Bouc-Wen-Modell

Pneumatische Muskeln stellen innovative Zugaktoren dar, die aus einem mit speziellen Fasern verstärkten vulkanisierten Gummischlauch bestehen. Die beiden Enden der pneumatischen Muskeln sind mit geeigneten Anbindungsstücken abgeschlossen. Das Arbeitsprinzip basiert auf einer rautenförmigen Faserstruktur, welche zu einer Muskelkontraktion in longitudinaler Richtung führt, wenn der Muskel mit Druckluft gefüllt wird. Diese Kontraktion kann zu Antriebszwecken genutzt werden.

Pneumatische Muskeln sind kostengünstige Aktoren, welche sich durch folgende Vorteile gegenüber klassischen pneumatischen Zylindern auszeichnen: bedeutend weniger Gewicht, kein Stick-Slip-Effekt, Unempfindlichkeit gegenüber schmutziger Arbeitsumgebung und ein höheres Kraft/Gewicht-Verhältnis. Zudem kann die Elastizität der pneumatischen Muskeln einen Vorteil hinsichtlich der Sicherheit bei der Interaktion zwischen Mensch und Maschine bieten. Ein großer Vorteil pneumatischer Antriebe im Vergleich zu elektrischen Antrieben ist deren Potential, große Maximalkräfte auch über längere Zeitperioden bereitstellen zu können. Bei elektrischen Antrieben besteht in diesem Fall die Gefahr einer starken Erhitzung, was zu ansteigenden Fehlern aufgrund thermischer Ausdehnung oder zu Ausfall führen kann.

Pneumatische Muskeln zeichnen sich durch eine deutliche Nichtlinearität der Kraft- und Volumencharakteristik aus. Diese Nichtlinearitäten müssen bei der Regelung von mit pneumatischen Muskeln angetriebenen Systemen berücksichtigt werden, vgl. [2], [3]. Die Kraftcharakteristik ist außerdem mit einer ausgeprägten Hysterese behaftet. Zur Modellierung dieser Hysterese wird in [4] ein quasi-statisches Modell verwendet. Ein weit verbreiteter Ansatz zur Hysterese-Modellierung ist das Bouc-Wen-Modell. Dabei handelt es sich um ein dynamisches Modell, das in der Lage ist, die wesentlichen Hysterese-Effekte bei gleichzeitig akzeptablem Implementierungsaufwand zu erfassen. Das klassische Bouc-Wen-Modell eignet sich allerdings nur zur Beschreibung von symmetrischen Hysterese-Kurven. Da die Hysterese in der Kraftcharakteristik der pneumatischen Muskeln jedoch stark asymmetrisch ist, wird hier auf das generalisierte Bouc-Wen-Modell zurückgegriffen, vgl. [1], welches in der Lage ist, stark asymmetrische Hysterese-Charakteristiken darzustellen.

Zur Identifikation der Kraft- und Volumencharakteristik von pneumatischen Muskeln wurde am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Rostock ein entsprechender Prüfstand aufgebaut. Dieser Prüfstand besteht aus einem hydraulisch betriebenen Gleichlaufzylinder, der die benötigte Gegenkraft für die pneumatischen Muskeln aufbringt und über entsprechende Sensoren zur Erfassung der Muskelkraft, des Muskelinnendrucks und der Muskelkontraktion verfügt. Das statische Kraftkennfeld kann durch einen Polynomansatz hinreichend genau approximiert werden. Die Koeffizienten dieses Polynoms lassen sich durch die Minimierung eines quadratischen Gütemaßes bestimmen. Durch den Vergleich der Kraftmessungen mit dem statischen Kraftkennfeld kann anschließend die Hysterese aus dem Kraftverlauf identifiziert werden. Die Beschreibung der Hysterese mit dem generalisierten Bouc-Wen-Modell führt auf eine Differentialgleichung erster Ordnung mit neun zunächst unbekanntem Parametern, die durch die Lösung eines Optimierungsproblems bestimmt werden können. Für diesen Zweck wird die Optimierungsroutine CMAES [5] verwendet, welche auf einer Evolutionsstrategie basiert.

Eine bestehende modellbasierte nichtlineare Regelungsstruktur kann damit um das generalisierte Bouc-Wen-Modell mit den identifizierten Parametern erweitert werden. Auf diese Weise lässt sich die Hysterese in der Kraftcharakteristik der pneumatischen Muskeln weitestgehend kompensieren und das Trajektorienfolgeverhalten verbessern. Zur Validierung moderner Regelungsstrategien stehen am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Rostock zwei Prüfstände mit pneumatischen Muskeln zur Verfügung: eine High-Speed-Linearachse [2] sowie ein Parallelroboter mit zwei Freiheitsgraden [3]. Experimentelle Ergebnisse an diesen Prüfständen zeigen die Effektivität der vorgestellten Strategie zur Kompensation der Muskel-Hysterese auf.

Literatur:

- [1] J. Song and A. Der Kiureghian: Generalized Bouc-Wen model for highly asymmetric hysteresis. *Journal of Engineering Mechanics*, 132(6): 610-618, 2006.
- [2] D. Schindele and H. Aschemann: Sliding Mode Control applied to a novel linear axis actuated by pneumatic muscles, In A. Bartoszewicz (Ed.), *Sliding Mode Control*, pp. 369-384, InTech, Rijeka, Croatia, 2011.
- [3] D. Schindele and H. Aschemann: Trajectory Tracking of a pneumatically driven parallel robot using higher-order SMC, *Proceedings of 15th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, pp. 87-392, Miedzyzdroje, Poland, 2010.
- [4] T. Vo-Minh, T. Tjahjowidodo, H. Ramon and H. van Brussel: A new approach to modeling hysteresis in a pneumatic artificial muscle using the Maxwell-slip model, *IEEE Transactions on Mechatronics*, 16(1):177-186, 2011.
- [5] N. Hansen: The CMA evolution strategy: a comparing review. In J.A. Lozano, P. Larranaga, I. Inza, and E. Bengoetxea (Eds.), *Towards a new evolutionary computation, Advances on estimation of distribution algorithms*, pp. 75-102. Springer, 2006.

Verteilte prädiktive Regelung mit Kommunikation für verkoppelte Systeme

Dominic Groß *

* Regelung- und Systemtheorie
Universität Kassel
Wilhelmshöher Allee 73
0561-804-6492
0561-804-6383
dgross@uni-kassel.de

Olaf Stursberg **

** Regelungs- und Systemtheorie
Universität Kassel
Wilhelmshöher Allee 73
0561-804-6375
0561-804-6383
stursberg@uni-kassel.de

Schlüsselwörter: Verteilte Systeme, Kommunikation, robuste Modellprädiktive Regelung

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur verteilten modellprädiktiven Regelung von linearen Systemen mit globalen Regelungszielen und gekoppelten Nebenbedingungen vorgestellt.

Verteilte technische Systeme zeichnen sich durch die räumliche Trennung einzelner interagierender und lokal geregelter Teilsysteme aus. Diese räumliche Trennung erfordert einen Informationsaustausch zwischen Reglern über ein geeignetes Kommunikationssystem. Die Eigenschaften des Kommunikationssystems, wie nicht-deterministische Verzögerung der Signalübertragung oder der Verlust von Information haben dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Regelgüte und Stabilität. Abb.1 zeigt ein Gesamtsystem bestehend aus verkoppelten Teilsystemen, lokalen Reglern und einem Kommunikationsnetzwerk, das eine variable Struktur besitzen kann.

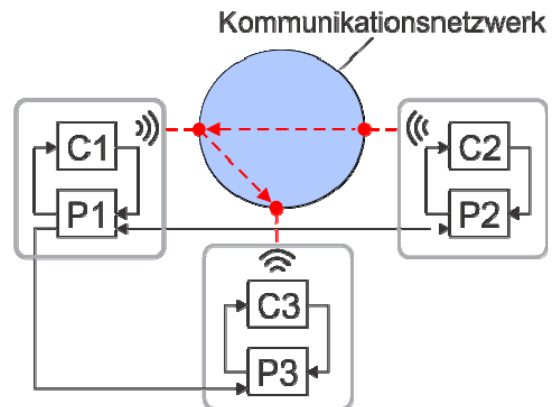


Abbildung 1: Verteiltes Systemmodell mit Kommunikationsnetzwerk, verkoppelten Teilsystemen P und lokalen Reglern C.

Modellprädiktive Regelung (MPR) ist für vernetzte Regelsysteme vorteilhaft, da Informationen über geplantes zukünftiges Verhalten mit anderen Teilsystemen ausgetauscht und in der Optimierung der lokalen Regler berücksichtigt werden kann. Eine grundlegende Idee dieses Beitrags ist es, den Einfluss anderer Teilsysteme als beschränkte Störung aufzufassen. Jeder Teilregler kommuniziert dabei prädizierte und optimierte Zustands- und / oder Stellgrößentrajektorien sowie Informationen über zulässige Abweichungen davon an jene Teilsysteme, die entsprechend der (momentanen) Kommunikationsstruktur verbunden sind. Hieraus resultiert für jedes Teilsystem ein robustes modellprädiktives Regelungsproblem, das die globalen Regelungsziele, gekoppelte Nebenbedingungen sowie die mögliche Unsicherheit der kommunizierten Informationen berücksichtigt.

Ein Anwendungsbeispiel ist die verteilte Regelung einer Fahrzeugkolonne wie in Abb. 2 dargestellt. Hierbei sollen die Fahrzeuge einem Führungsfahrzeug mit kons-

tantem Sollabstand folgen. Aus der Anforderung der Kollisionsvermeidung ergeben sich hierbei gekoppelte Nebenbedingungen.

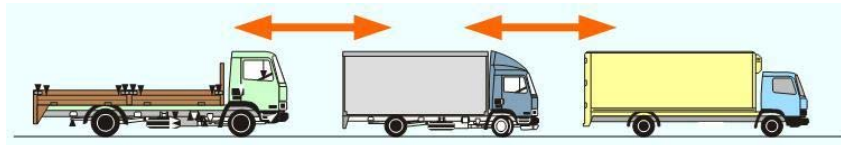


Abbildung 2: Anwendungsszenario Kolonnenbildung im Straßenverkehr.

Literatur:

- [1] D. Groß, and O. Stursberg. Robust Distributed Predictive Control of Communicat- ing and Constrained Systems. 18th IFAC World Congress, 8926-8932, 2011.
- [2] J. Dold, and O. Stursberg. Robuste modellprädiktive Regelung kommunizierender Fahrzeugkolonnen. Automatisierungstechnik, 58:207–216, 2010.
- [3] P.J. Goulart, and E.C. Kerrigan, and J.M. Maciejowski. Optimization over state feedback policies for robust control with constraints. Automatica, 42:523 – 533, 2006.
- [4] A. Richards, and J. P. How. Robust Distributed Model Predictive Control. Interna- tional Journal of Control, 80:1517 – 1531, 2007.
- [5] W.B. Dunbar, and R.M. Murray. Distributed receding horizon control for multi- vehicle formation stabilization. Automatica, 42:549-558, 2006.

Robuste Regelung von Multiagentensystemen mit zeitvarianten Kommunikations-Topologien und -Totzeiten

Andrey Popov und Herbert Werner

Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg
Eissendorferstraße 40, 21073 Hamburg

Systeme mit kooperierenden autonomen Agenten, Robotern oder Fahrzeugen, die miteinander kommunizieren und dezentral geregelt werden, bieten eine höhere Zuverlässigkeit und Flexibilität als zentralisierte Regelansätze. In den letzten Jahren wurden im Bereich der kooperativen Regelung und Koordination von Fahrzeugformationen Bedingungen angegeben, die unter bestimmten Annahmen über die Kommunikationstopologie garantieren können, dass ein Multiagentensystem eine Aufgabe ausführen oder einen Konsens erreichen kann [1, 4, 5]. Da aber der Informationsaustausch zwischen Agenten von den Abständen, von Umgebungshindernissen, vom Messrauschen und von den Kommunikations-Totzeiten abhängt, ist in der Praxis nicht garantiert, dass diese Annahmen erfüllt sind.

In diesem Vortrag wird die robuste Stabilität von Multiagentensystemen mit veränderlicher Anzahl von Agenten, schaltender Kommunikationstopologie und zeitvarianten Kommunikations-Totzeiten betrachtet. Es wird eine notwendige und hinreichende Bedingung für die Stabilität eines Multiagentensystems mit beliebiger Anzahl von Agenten, konstanter Topologie und konstanten Totzeiten vorgestellt, die die robuste Stabilitätsanalyse auf den Test des strukturierten Singulärwertes μ eines einzelnen Agenten mit Unsicherheit reduziert. Im Gegensatz zu den in [1, 5] vorgeschlagenen Bedingungen lässt sich dieses Ergebnis leicht um Performance-Kriterien erweitern und damit für einen robusten Reglerentwurf mit Ausgangsrückführung verwenden. Weiterhin wird für Multiagentensysteme mit schaltender Topologie und veränderlichen Totzeiten eine hinreichende Bedingung für robuste Stabilität vorgestellt, die auf eine obere Schranke für die ℓ_1 -Norm eines einzelnen Agenten mit Unsicherheit reduziert werden kann. Im Unterschied zu [5], wo für das gleiche Problem (allerdings ohne Totzeiten) eine beobachtergestützte Lösung vorgestellt wird, kommunizieren im hier vorgeschlagenen Verfahren die Agenten nur ihre Positionen und keine geschätzten Zustandsvektoren [3].

Es wird weiterhin gezeigt, wie die vorgestellten Analyse-Ergebnisse auch zur Synthese von robusten H_∞/ℓ_1 -Formationsreglern verwendet werden können. Dies ist vor allem attraktiv bei großen Multiagentensystemen, da die Reglersynthese unabhängig von der tatsächlichen Topologie und der Anzahl der Agenten durchgeführt werden kann. Dass die ℓ_1 -Bedingung für robuste Stabilität nicht zu konservativ ist und zu robusten Formationsreglern mit hoher Regelgüte führt, wird in Simulationsstudien und experimentellen Ergebnissen der Formationsregelung von Quadroptern illustriert [2].

Literatur

- [1] J. Alexander Fax and Richard M. Murray. Information flow and cooperative control of vehicle formations. *IEEE Journal on Automatic Control*, 49(9):1465–1476, 2004.
- [2] Ulf Pilz and Herbert Werner. A multi-objective control approach to cooperative control of multi-agent systems. Eingereicht für *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.
- [3] Andrey Popov and Herbert Werner. Robust stability of a multi-agent system under arbitrary and time-varying communication topologies and communication delays. Akzeptiert zur Veröffentlichung in *IEEE Transactions on Automatic Control*.
- [4] W. Ren and R. W. Beard. *Distributed Consensus in Multi-Vehicle Cooperative Control - Theory and Applications*. Communications and Control Engineering. Springer Publishing Company, Incorporated, 2007.
- [5] Luca Scardovi and Rodolphe Sepulchre. Synchronization in networks of identical linear systems. *Automatica*, 45(11):2557 – 2562, 2009.

Effiziente Modellierung und Simulation vernetzter Automatisierungssysteme

Liu Liu

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Universität des Saarlandes
66123 Saarbrücken
Tel.: +49-681-302-57596
Fax: +49-681-302-57595
liu.liu@aut.uni-saarland.de

Georg Frey

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Universität des Saarlandes
66123 Saarbrücken
Tel. +49-681-302-57590
Fax: +49-681-302-57595
georg.frey@aut.uni-saarland.de

Schlüsselwörter: Hybride Systeme, Ereignis-optimierte Modellierung, effiziente Simulation

Moderne technische Systeme nutzen die zunehmenden Vernetzungsmöglichkeiten und leistungsstarke Komponenten zur Informationsverarbeitung und -übertragung, um physikalische Prozesse koordiniert zu steuern oder zu regeln. Solche Systeme finden sich in vielen Anwendungsgebieten (Automobile, Energiesysteme, Automation usw.). Fachausdrücke wie **Networked Automation/Control System (NAS/NCS)**, **C³-System (Computation, Communication, Control)** und **Cyber-Physical System (CPS)** wurden geprägt, um bestimmte Systemeigenschaften und damit verbundene neue Herausforderung hervorzuheben: die enge Kopplung zwischen informationellen („Cyber“) und physikalischen („Physical“) Komponenten sowie deren gegenseitige Beeinflussung.

Im Hinblick auf ihre Modellierung und Simulation sind vernetzte Automatisierungssysteme hybride Systeme. Entwurf und Analyse solcher Systeme benötigen besondere Werkzeugunterstützung, die das Verhalten des gesamten Systems erfassen kann. Offensichtlich ist die Simulation das vielseitigste Werkzeug, das die nichtlineare kontinuierliche und die komplexe ereignisdiskrete Dynamik sowie deren Interaktion bewältigen kann [1]. Die Simulation erfordert Modelle, die das Zeitverhalten der Automatisierungsgeräte und der eingesetzten Netzwerke beschreiben. Ein geeigneter Modellierungsansatz muss nicht nur die unterschiedlichen Modellformen (kontinuierlich, zeitdiskret und ereignisdiskret) erstellen, sondern auch die komplexe heterogene Struktur erfassen können.

Die gleichungsbasierte, objektorientierte Modellierungssprache Modelica[®] ist besonders leistungsstark bei der Modellierung komplexer und heterogener physikalischer Systeme. Ebenfalls eignet sich die Sprache für die Modellierung diskreter und hybrider Systeme, wie in [2] illustriert. Da Modelica[®] an sich nur eine textuelle Sprache ist, ist die Lesbarkeit einer direkten Implementierung von ereignisdiskretem Verhalten sehr begrenzt. Dagegen lässt sich komplexes diskretes Verhalten durch einen graphischen Formalismus, wie z.B. einen UML-Zustandsautomaten, übersichtlich darstellen. Die Integration der Beschreibungsfähigkeit von UML und der Simulationsfähigkeit von Modelica[®]-Werkzeugen bietet neue Möglichkeiten für die Modellierung und Simulation von diskreten Systeme.

In diesem Beitrag wird eine strukturierte Konvertierungsmethode von UML-Zustandsautomaten in Modelica[®]-Code vorgestellt. Zusätzlich werden durch die Verwendung von Sequenzdiagrammen die Ausführungsregeln der Simulations-Laufzeitumgebung verdeutlicht. Das Sequenzdiagramm ermöglicht auch, bestimmte Programmabläufe (Nebenläufigkeiten, logische Ablaufbedingungen) – angepasst an

die Besonderheiten der Laufzeitumgebung des verwendeten Simulators – grafisch darzustellen. Diese Zustandsautomaten und Sequenzdiagramme bilden die Basis für eine effiziente und fehlerfreie Modellierung komplexer ereignisdiskreter Systeme und wurden zur Implementierung der Modelica®-Bibliothek NCLib [3] eingesetzt. NCLib zeichnet sich durch eine stark strukturierte Modellierung und konfigurierbare Modelle aus, die bekannte Kommunikationsnetzwerke und eingebettete Controller beschreiben können. Dadurch lässt sich detailliertes temporales Verhalten des gesamten Systems nachbilden.

Bei der Simulation großer hybrider Systeme (z.B. Abb. 1a) stellen die Ereigniserkennung und die folgenden Neustarts des Löser mit sehr kleinen Schrittweiten den hauptsächlichen Rechenaufwand dar. Deswegen ist die NCLib bereits auf Modellebene auf eine geringe Anzahl von Ereignissen optimiert. Eine weitere Optimierungsmaßnahme ist das separierte Simulationsschema [4] (Abb. 1b, c, d). Der Leistungsvergleich in Tabelle 1 verdeutlicht die im Beispiel erreichte Laufzeiteffizienz durch das Ereignis-optimierte Modell und/oder das separierte Simulationsschema.

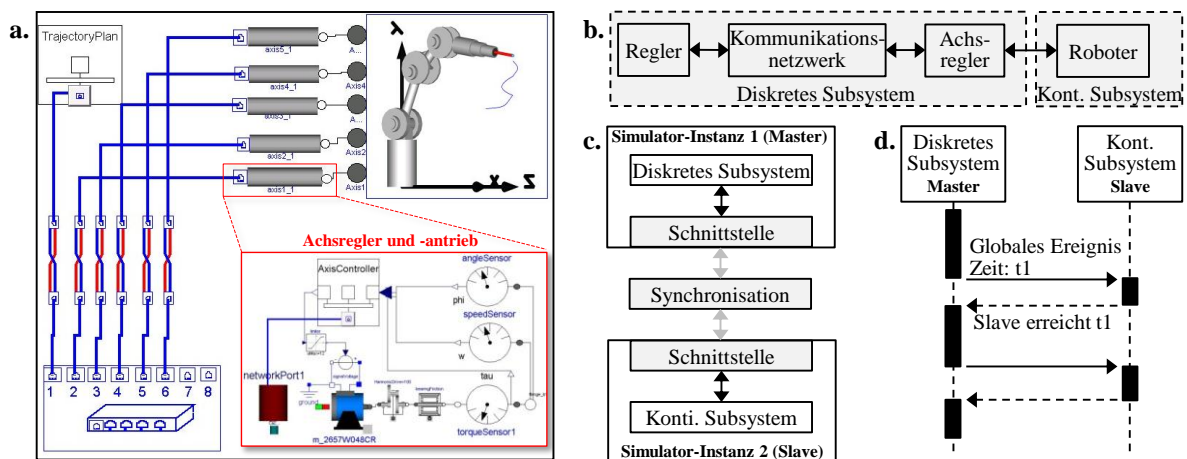


Abbildung 1: a. Robotersystem (1077 Komponenten, 11.464 Variablen); b. Hybride Modellstruktur; c. Separiertes Simulationsschema; d. Synchronisationsablauf.

	Referenz-Modell ohne Optimierung	Ereignis-optimiertes Modell ¹	Separierte Simulation mit Referenz-Modell	Separierte Simulation mit Ereignis-optimiertem Modell
CPU-Zeit ²	46 s	13 s	16 s	5 s

Tabelle 1: Vergleich der Rechenzeiten mit dem CPS-Modell aus Abbildung 1.

Literatur:

- [1] Engell, S.; Schnieder, E.; Frehse, G.: Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems. Springer Berlin, 2002. S. Preface VII.
- [2] Elmqvist, H.; Mattson, S.E.; Otter, M.: Object-Oriented and Hybrid Modeling in Modelica, Journal Européen des systèmes automatisés, 35, 1/2001; S. 1-22.
- [3] Frey, G.; Liu, L.: Modellierung und Simulation vernetzter Automatisierungs- und Regelungssysteme in Modelica. at Automatisierungstechnik, Sept. 2009, S. 466-476.
- [4] Liu, L.; Frey, G.: Efficient Simulation of Hybrid Control Systems in Modelica/Dymola. Proc. MATHMOD 2009, Vienna, Austria, 2009, S. 1344-1352.

¹ Beispiel: Ein D/A-Wandler arbeite zyklisch mit einer festen Abtastzeit von 0,1 ms. Der zugehörige Sensorwert werde aber nur alle 20 ms abgefragt. Statt die genaue Abtastung zu modellieren, wird eine Ereignis-optimierte Ausführung implementiert.

² Je Sekunde simulierter Zeit; Windows 7-Rechner mit 3,17-GHz-Intel® Core™ 2 Duo-Prozessor und 4 GB Arbeitsspeicher; Dymola 7.4 mit Modelica 3.1; Löser: LSODAR mit Toleranz = 0,0001.

Einsatz eines RGB-D-Sensors zur schwingungsgedämpften Positionierung eines gliedelastischen Roboterarms

Jörn Malzahn*

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

* Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik
Technische Universität Dortmund
Otto-Hahn-Str. 4 44227 Dortmund
Telefon: (+49)231 755-3592
Fax: (+49)231 755-2752
E-Mail: joern.malzahn@tu-dortmund.de

** Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik
Technische Universität Dortmund
Otto-Hahn-Str. 4 44227 Dortmund
Telefon: (+49)231 755-2760
Fax: (+49)231 755-2752
E-Mail: torsten.bertram@tu-dortmund.de

Schlüsselwörter: Gliedelastische Roboter, Schwingungsdämpfung, bildbasierte Regelung

Die Forschung zur Regelung gliedelastischer Roboterarme ist Ende der 70er Jahre überwiegend aus dem Themenfeld der Weltraumrobotik getrieben. Die für den Transport ins All erforderliche Gewichtsreduktion führt zu unerwünschten elastischen Effekten entlang der einzelnen Armkörper. Heute motivieren in terrestrischen Anwendungen Schwingungen, beispielsweise bei Feuerwehdrehleitern, Betonpumpen sowie Großraummanipulatoren für Inspektions- und Wartungsarbeiten, verstärkt die Entwicklung neuer Methoden zur Regelung serieller kinematischer Ketten mit elastischen Gliedern. Des Weiteren wird von zukünftigen Robotergenerationen erwartet, dass sie mit ungeschulten Benutzern in einem unstrukturierten dynamischen Umfeld sicher auch physisch interagieren können. In leichteren und inhärent nachgiebigen kinematischen Strukturen, wie sie bei gliedelastischen Roboterarmen vorhanden sind, wird diesbezüglich ein großes Potenzial speziell in der Service-Robotik gesehen.

Vor diesem Hintergrund befasst sich der Beitrag mit der bildbasierten Regelung des mehrgliedrigen gliedelastischen Experimentalsystems TUDOR, das in **Bild 1** dargestellt ist. TUDOR besitzt drei Freiheitsgrade sowie zwei elastische Armkörper, die mit Dehnungsmessstreifen versehen und in der vertikalen Ebene schwingungsfähig sind. Am Armendpunkt befindet sich eine RGB-D-Kamera, die ergänzend zu einem konventionellen RGB-Farb-Bild zu jedem Pixel auch eine Abstandsinformation liefert. Zusätzlich zu den dynamischen Schwingungen erschwert die gravitationsbedingte statische Verbiegung der elastischen Armkörper eine Positionierung des Endeffektors. Diese statische Verbiegung ist, wie auch die Lage der Schwingungsfrequenzen,

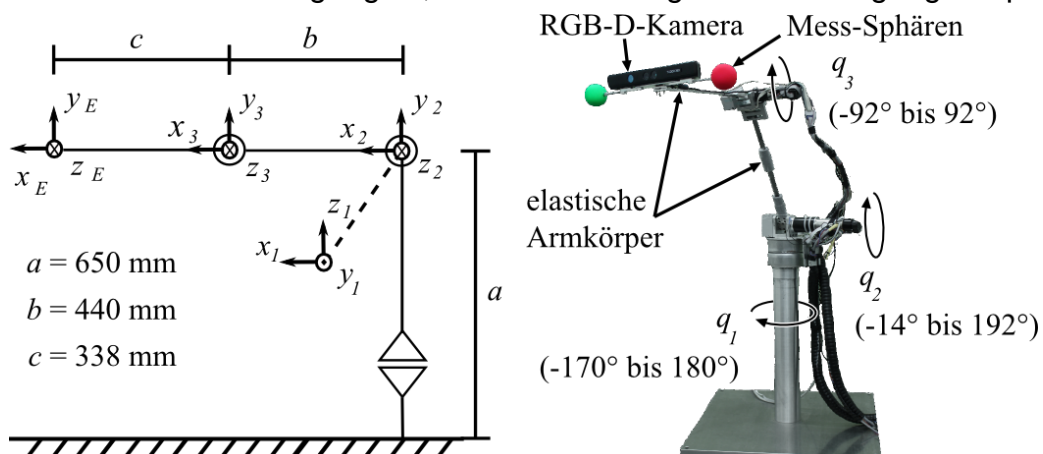


Bild 1: Kinematik (*links*) und Foto (*rechts*) von TUDOR (Technische Universität Dortmund omnielastischer Roboterarm).

von der Last- und der Armkonfiguration abhängig. Bildbasierte Regelungskonzepte mit einer Auge-In-Hand-konfigurierten Kamera stellen eine elegante Alternative zu modellbasierten Konzepten dar, die häufig eine explizite Schätzung der statischen Verbiegung beinhalten. Eine umfangreiche Übersicht über diesbe-

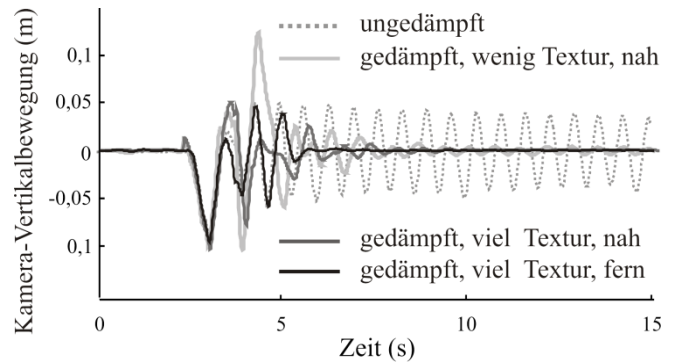


Bild 2: Ergebnis einer bildbasierten Schwingungsdämpfung für unterschiedlich texturierte Szenen.

zügliche Modellierungs- und Regelungsansätze ist in [1] gegeben. Im Gegensatz dazu wird bei der rein

bildbasierten Regelung die Regelabweichung unmittelbar im Bildkoordinatensystem einer einzelnen am Armendpunkt montierten Kamera gebildet. Speziell im Bezug auf die Service-Robotik ist anzunehmen, dass Kameras auch zukünftig eine zentrale Rolle als vielseitige Sensoren zur Umfeldwahrnehmung einnehmen werden und damit ohnehin auf der Roboterplattform vorhanden sind.

Die Stellgröße des bildbasierten Reglers besteht aus den Achsgeschwindigkeiten, die von einer unterlagerten Achsregelung realisiert werden. Auf diese Weise kann der Positionsfehler zwischen Ziel- und Ist-Ansicht minimiert werden, ohne dass eine genaue Kenntnis der Armverbiegung erforderlich ist. In diesem Beitrag wird die in den aufgenommenen Bildfolgen bereits vorhandene Bewegungsinformation zusätzlich zur Dämpfung der unerwünschten Armschwingungen genutzt. Dazu kommt eine zur Laufzeit modellfreie dezentrale Regelung zum Einsatz, die ursprünglich auf Basis von entlang der Armstruktur verteilten Dehnungsmessungen entwickelt wurde [2]. Ein Ergebnis der bildbasierten Schwingungsdämpfung ist in **Bild 2** zu sehen.

Die aus den Bildfolgen unstrukturierter und dynamischer Szenen im Umfeld des Roboters extrahierte Eigenbewegung der Kamera beinhaltet die Überlagerung der Schwingungsbewegungen aller Armkörper. Über die differenzielle Kinematik des elastischen Roboterarms wird der Anteil jedes einzelnen Armkörpers zur Kamerabewegung ermittelt. Das so erhaltene Schwingungssignal ersetzt schließlich die Dehnungsmessungen im Regelungskonzept.

Bei Verwendung konventioneller Kameras wird die Rekonstruktion der Kameraeigenbewegung durch den Verlust der Tiefeninformation erschwert. Der Einsatz des RGB-D-Sensors umgeht dies, sodass darauf aufbauend vier unterschiedliche Ansätze zur Rekonstruktion der Kameraeigenbewegung diskutiert werden. Der durch die Bildaufnahme und -verarbeitung eingeführten Sensortotzeit wird über eine Prädiktion auf Basis eines zur Laufzeit identifizierten autoregressiven Signalmodells begegnet.

Literatur:

[1] Tokhi, M.O.; Azad, A.K.M.. (2008). Flexible robot manipulators: modelling, simulation and control. The Institution of Engineering and Technology: London.

[2] Malzahn, J.; Phung, A.S.; Hoffmann, F.; Bertram, T.: Vibration Control of a Multi-Flexible-Link Robot Arm Under Gravity. In: *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Phuket (Thailand), 7.-11. Dezember 2011.

Multisensor Konturverfolgung an nachgiebigen Objekten

Heiko Koch*

* Hochschule Darmstadt
Fachbereich Elektrotechnik und
Informationstechnik
Birkenweg 8, 64295 Darmstadt
+49(0)6151/16-8306
hkoch@eit.h-da.de

Jozef Suchý **

** Technische Universität Chemnitz
Fakultät für Elektrotechnik und
Informationstechnik
Reichenhainer Str. 31-33, 09126 Chemnitz
+49(0)371/531-33427
jozef.suchy@etit.tu-chemnitz.de

Schlüsselwörter: Konturverfolgung, Visual Servoing, Sensor Fusion

Bei Konturverfolgungsaufgaben, wie z.B. dem robotergestützten Nähen oder Fräsen muss die Position und die Orientierung des Werkzeuges an eine sichtbare Kontur des Werkstückes angepasst werden. Insbesondere bei Kontakt an nachgiebigen Materialien stellt dies erhöhte Anforderungen an die Automatisierung dar, da Kopplungen durch den gleichzeitigen Einsatz von Bild- und Kraftregelung entstehen. Die Konturverfolgung an nachgiebigen Objekten wird in dieser Arbeit beschrieben und die Kompensation der Objektverformung zur Entkopplung vorgestellt. Umgebungsparameter werden durch Identifikation ermittelt.

Zur bildgestützten Konturverfolgung wird die Kontur durch einen am Roboter montierten Laser-Triangulationssensor in Basiskoordinaten gemessen. Der Sensor misst mit einer Vorlaufdistanz von z.B. 50mm vor dem Werkzeug entlang der Kontur. Die Orientierung und Position des Tool-Center-Points (TCP) des Werkzeugs wird an den gemessenen Pfad angepasst. Durch die vorausschauende Messung sind online generierte Pfadinformationen vorzeitig verfügbar, sodass Verzögerungen des Robotersystems berücksichtigt werden können [1].

Der Kontakt mit dem Material bei einer gleichzeitigen Kraftregelung erzeugt insbesondere bei nachgiebigen Materialien Verformungen. Die visuelle Messung entlang der Kontur wird durch die Verformung beeinflusst, da die Bildregelung nicht zwischen einer tatsächlichen Form der Kontur und einer Verformung durch Kontakt unterscheiden kann. Abbildung 1 zeigt die Messung an einer geradlinigen Kontur auf einem nachgiebigen Material. Durch die Änderung der Kontaktkraft entsteht die Messung in der blau gestrichelten Kurve. Die Adaption der Orientierung führt zu signifikanten Fehlstellungen (siehe Abbildung 2, blau gestrichelt).

Mit der Modellierung des Werkstückes durch ein Feder-Masse-Dämpfer System (die Parameter sind abhängig von der Position entlang der Kontur) wird die Verformung des Materials unter der aktuellen Kontaktkraft berechnet. Zur Kompensation wird die berechnete Verformung von der Bildinformation subtrahiert (Abbildung 1, rot). Die verbesserte Anpassung der Orientierung ist in Abbildung 2, rot zu sehen [2].

Zur Identifikation des zuvor beschriebenen Modells sind die Auslenkung (Position des TCP) und die Kontaktkraft (Kraftmessung) erforderlich. Die Position des TCP im Kontaktpunkt wird durch die Robotersteuerung aus der Winkelmessung der Antriebsmotoren unter Verwendung der Vorwärtskinematik berechnet. Mechanische Verzögerungen zwischen An- und Abtrieb im Antriebsstrang werden dabei nicht be-

rücksichtigt, sodass die Dynamik des Signals beeinträchtigt wird. Ein Beobachter für die Roboterposition wird eingesetzt, wobei ein am Roboter montierter Beschleunigungssensor zur Vorsteuerung verwendet wird [2]. Dadurch wird die Messung der tatsächlichen Bewegung verbessert.

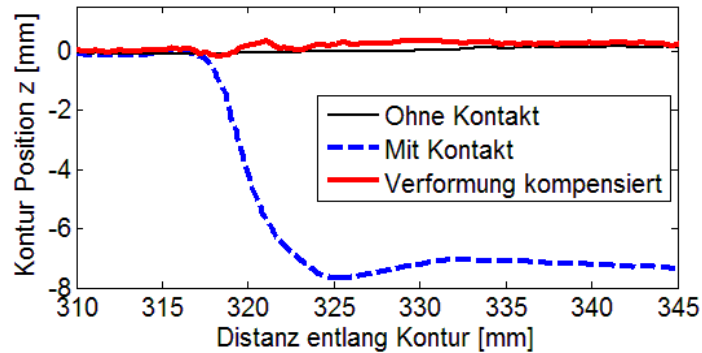


Abb. 1: Die Änderung der Kontaktkraft verformt das Material und beeinflusst die visuelle Messung. Durch Kompensation wird die ursprüngliche Form berechnet.

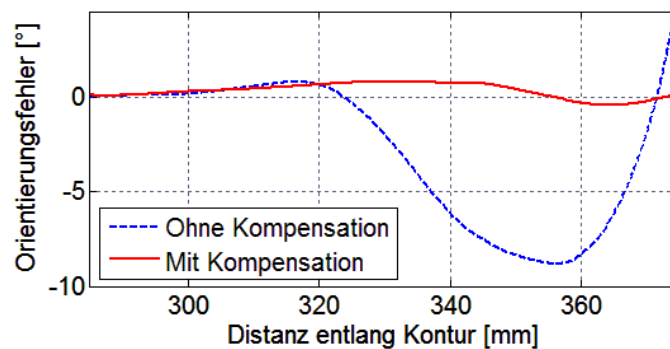


Abb. 2: Die Verformung bei veränderter Kontaktkraft erzeugt Fehlstellungen entlang der Kontur. Die Kompensation reduziert diesen Fehler.

Literatur:

- [1] H. Koch, A. König, K. Kleinmann, A. Weigl-Seitz, and J. Suchý, "Predictive robotic contour following using laser-camera-triangulation," in IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011, pp. 422 - 427
- [2] H. Koch, A. König, A. Weigl-Seitz, K. Kleinmann, and J. Suchý, "Force, acceleration and vision sensor fusion for contour following tasks with an industrial robot," in IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE), 2011, pp. 1 - 6.

Hemisphärische Beleuchtungsmuster für die automatische Sichtprüfung

Robin Gruna *

Jürgen Beyerer **

* Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme
Karlsruhe Institut für Technologie KIT
Adenauerring 4, 76131 Karlsruhe
Telefon +49 (0) 721 6091-263
E-Mail: robin.gruna@kit.edu

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

Schlüsselwörter: Automatische Sichtprüfung, Bildverarbeitung, Beleuchtungsserien, Lichttransport

Die Auswahl einer geeigneten Beleuchtung gehört zu den wichtigsten Schritten bei der Planung und dem Entwurf eines automatischen Sichtprüfsystems. Erst durch eine an die Sichtprüfaufgabe angepasste Beleuchtung wird es möglich, die prüfrelevanten Eigenschaften eines Objekts zu erfassen und mithilfe digitaler Bildverarbeitung auszuwerten. Gerade in zeitkritischen Anwendungen ermöglicht eine problem-spezifische Beleuchtung die Gewinnung von Inspektionsbildern für die der rechen-technische Aufwand der Bildverarbeitung und -auswertung reduziert werden kann. Beispielsweise können durch eine Anpassung der Polarisation, der Richtung und/oder des Spektrums der Beleuchtung Defekte mit höherem Signal-Rausch-Abstand abgebildet werden, was die Anwendung schneller Schwellwertoperationen statt rechenintensiver Segmentierungsverfahren für die Bildauswertung erlaubt.

Das Reflexionsverhalten einer Szene auf ein beleuchtendes Lichtfeld ist in deren Reflektanzfeld kodiert. Ein etabliertes Beleuchtungsverfahren aus der automatischen Sichtprüfung stellt die Abtastung des Reflektanzfelds mittels Beleuchtungsserien dar, bei denen das zu inspizierende Objekt unter variierten Beleuchtungsrichtungen aufgenommen wird. Dadurch wird für jeden Bildpunkt ein mehrdimensionaler Vektor von Reflektanzmerkmalen gewonnen, auf dessen Basis beispielsweise Defekte auf stark texturierten Oberflächen detektiert oder Materialien klassifiziert werden können. Bisherige Ansätze schränken sich hierbei jedoch auf relativ einfache und problemun-spezifische Beleuchtungsmuster ein, was zur Folge hat, dass für viele Anwendungen eine umfangreiche Serie bestehend aus vielen Inspektionsbildern aufgenommen werden muss.

In diesem Beitrag wird ein Beleuchtungsverfahren vorgestellt, das problemangepas-s-te hemisphärische Beleuchtungsmustern einsetzt, indem lineare Funktionen für die Extraktion von Reflektanzmerkmalen direkt in den Beleuchtungsmustern kodiert werden. Ermöglicht durch die Linearität des Lichttransports kann dadurch die Merkmals-extraktion vom Bildraum in die optische Domäne übertragen werden, mit dem Ergeb-nis, dass weitaus weniger Bildaufnahmen für die Gewinnung einer Beleuchtungsserie während des Inspektionsprozesses nötig sind. Für die experimentelle Validierung des Verfahrens wird ein programmierbares Beleuchtungssystem basierend auf ei-nem digitalen Projektor verwendet, das die Beleuchtung kleiner Objekte mit beliebigen hemisphärischen Beleuchtungsmustern ermöglicht.

Literatur:

- [1] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H. P. Duiker, W. Sarokin, und M. Sagar, „Acquiring the reflectance field of a human face“, in *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 2000, S. 145-156.
- [2] C. Lindner und F. P. Leon, „Reflection-based Surface Segmentation using Active Illumination“, in *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Sorrento, Italy, 2006, S. 157-162.
- [3] R. Gruna und J. Beyerer, „Acquisition and Evaluation of Illumination Series for Unsupervised Defect Detection“, in *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Hangzhou, China, 2011, S. 192-197.

Formale Verifikation von SPS-Programmen

Sebastian Biallas

Lehrstuhl Informatik 11 – Software für eingebettete Systeme (Prof. Kowalewski)
RWTH Aachen, Ahornstr. 55, 52074 Aachen
embedded.rwth-aachen.de

Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPSen) werden häufig in sicherheitskritischen Anwendungen eingesetzt, bei denen ein Fehlverhalten zu unmittelbarer Gefahr für Mensch oder Umwelt führen kann. Derzeit werden die Programme der SPSen typischerweise nur mit Hilfe manuell erstellter Testfälle überprüft, wobei die Gefahr besteht, dass Fehler übersehen werden.

Die formale Analyse der Korrektheit von SPS-Anwendungsprogrammen mit ihrem Versprechen, alle möglichen Programmabläufe vollständig zu erfassen, ist eine interessante methodische Ergänzung zum Testen. Aus diesem Grund wurden, auch in Boppard, in den letzten 15 Jahren verschiedene Ansätze zur formalen Verifikation von SPS-Programmen vorgestellt. Die beiden wesentlichen Einschränkungen bei allen Verfahren waren, dass ihre Anwendung mit einem hohen Modellierungsaufwand verbunden war und für realistische Programmgrößen nicht skalierte.

In diesem Vortrag wird ein Ansatz zur formalen Verifikation von SPS-Programmen vorgestellt, der die Methoden Model-Checking und Statische Analyse verbindet. Der Ansatz zeichnet sich dadurch aus, dass er direkt auf dem SPS-Programm arbeitet und ohne manuelle Transformation oder Modellierung durchgeführt wird. Ein Entwickler kann somit direkt nachvollziehen, ob das Programm einer Spezifikation genügt oder - andernfalls - eine Verletzung der Spezifikation anhand der dazu führenden Eingaben nachvollziehen.

Um dies zu erreichen, wird der Zustandsraum des Programms aufgebaut, wobei sich ein Zustand aus den momentanen Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie den internen Variablen (Merkern) der SPS zusammensetzt. Durch Aufzählung aller möglichen Neubelegungen der Eingänge und Simulation eines Zyklus des Programms werden dann Folgezustände gefunden. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis alle erreichbaren Zustände erzeugt sind. Der so erstellte Zustandsraum lässt sich daraufhin untersuchen, ob er bestimmten Spezifikationen (formuliert in logischen Formeln) genügt. Solche Formeln können einfache Beziehungen zwischen den Ein- und Ausgängen ausdrücken, beispielsweise „falls Nothalt gedrückt, dann Motor aus“. Es kann aber auch eine zeitliche Abfolge spezifiziert werden, wie etwa „nach einem Nothalt läuft der Motor erst wieder an, wenn vorher quitiert wurde“.

Um auch die Verifikation größerer Programmbausteine mit vielen Eingängen zu ermöglichen, ist es notwendig, das Programmverhalten zu abstrahieren. Hierbei werden mehrere einzelne Eingangsbelegungen, die zu gleichem oder hinreichend ähnlichem Programmverhalten führen, in einem Makrozustand zusammengefasst. Dies kann beispielsweise über Intervalle geschehen. Diese Abstraktion erfolgt vollautomatisch und adaptiv in Abhängigkeit der zu verifizierenden Eigenschaft.

Der vorgestellte Ansatz ist im Verifikationswerkzeug [mc]square umgesetzt, welches am Lehrstuhl Informatik 11 an der RWTH Aachen entwickelt wird.

Integration von Reglern in eine UML-basierte Entwicklungsumgebung für Speicherprogrammierbare Steuerungen

Gülden Bayrak *

* Lehrstuhl Automatisierung und Informationssysteme
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching bei München
Telefon: +49.89.289.16446
Fax: +49.89.289.16410
E-Mail: bayrak@ais.mw.tum.de

Birgit Vogel-Heuser **

** Lehrstuhl Automatisierung und Informationssysteme
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching bei München
Telefon: +49.89.289.16400
Fax: +49.89.289.16410
E-Mail: vogel-heuser@ais.mw.tum.de

Schlüsselwörter: Modellbasiertes Engineering, UML, IEC 61131, IEC 61499

Modellbasiertes Engineering von hybriden Systemen ist aufgrund des diskreten und kontinuierlichen Verhaltens eine Herausforderung. Zum einen müssen Beschreibungsmittel für alle Beteiligten einer Softwareentwicklung von hybriden Systemen (bspw. Regelungstechniker, Softwareentwickler, Technologen und Programmierer) geeignet und verständlich sein und zum anderen muss die Korrektheit der Implementierung und des Zeitverhaltens von hybriden Systemen sichergestellt werden. Die Auswahl von geeigneten Beschreibungsmitteln für hybride Systeme in der Umformtechnik und deren Kopplung wurde in [1] gezeigt. Aus den Anforderungen der Technologen der Umformtechnik an die Beschreibungsmittel wurde das Aktivitätsdiagramm der Unified Modeling Language (UML) als geeignete Modellierungssprache identifiziert. Für die Herstellung und Untersuchung von gradierten Eigenschaften an Versuchsanlagen müssen die Technologen die Möglichkeit haben unterschiedliche Prozessschritte flexibel miteinander kombinieren zu können. Die Prozessschritte einer Metallumformung können dabei sowohl einfache Prozessschritte wie „Transport eines Werkstücks“, als auch ein Prozessschritt mit einem Regleraufruf sein. Eine manuelle Übersetzung des Regler-Modells in die Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ist nicht notwendig. Ein vom Lehrstuhl entwickelter Codegenerator [1,3] ermöglicht eine automatische Transformation des diskreten Reglers in Simulink in die Continuous Function Chart (CFC) Programmiersprache unter

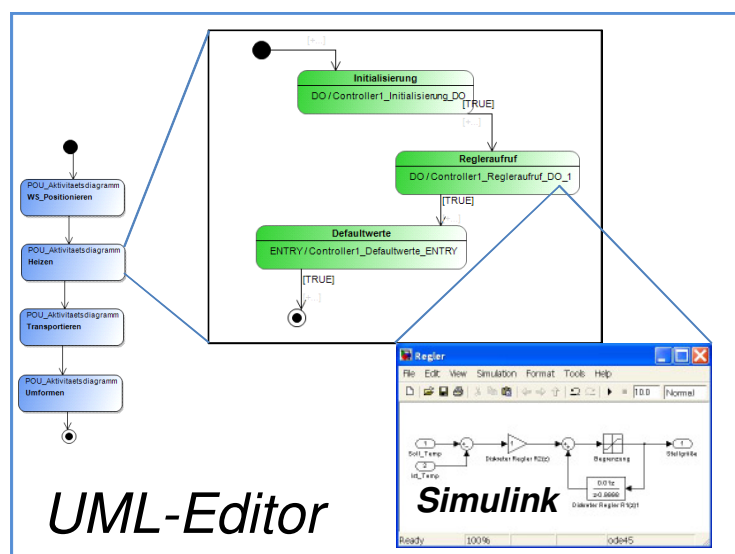


Abbildung 1: Integration von Reglern in eine UML-basierte Entwicklungsumgebung

Berücksichtigung der SPS-Eigenschaften. Die Korrektheit des Codegenerators wurde mit Hilfe von realen Simulink-Modellen einer Windkraftanlage und einer Papiermaschine bewiesen [3]. Es wurde gezeigt, dass der generierte Code zu 99,9% (Bestimmtheitsmaß) dem Zeitverhalten des Simulink-Modells entspricht.

Das Aktivitätsdiagramm ist in eine SPS-Programmierungsumgebung als UML-Editor (Plug-in) integriert. Das Plug-in bietet eine grafische Modellierung ohne zusätzlichen Programmieraufwand [4].

Der Vortag stellt einen Ansatz für die Integration von Reglern in eine UML-basierte Entwicklungsumgebung vor (Abbildung 1). Die Herausforderung liegt dabei, die Prozessschritte mit Reglern auf unterschiedliche Task-Zykluszeiten der SPS zu verteilen und die Performanz der Regler während der Laufzeit sicherzustellen. Dabei wird das Aktivitätsdiagramm mit der IEC 61499 unter Berücksichtigung von Usability Aspekten verglichen.

Literatur:

- [1] G. Bayrak, B. Vogel-Heuser, "Model-Based Development Concept for Hybrid Systems to Support Process Engineers in Thermo-Mechanical Process Development," Int. IFAC Workshop on PDeS, 2010, S. 179-184.
- [2] G. Bayrak, A. Flach, B. Vogel-Heuser, "New Methods of Process Management in the Development of Technological Treatments," in Functional Graded Materials in Industrial Mass Production, Rep. of Collaborative Research Centre TRR30, K. Steinhoff, H.J. Maier, and Biermann D. eds. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2009, S. 145-153.
- [3] G. Bayrak, A. Wannagat, B. Vogel-Heuser, "Echtzeit- und Regelungstechnische Aspekte bei der automatischen Transformation zwischen Matlab/Simulink und SPS-basierten Steuerungen," in Echtzeit und Mobilität, P. Hollecsek and B. Vogel-Heuser, eds. Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2007, S. 42-48.
- [4] D. Witsch, B. Vogel-Heuser, "Close integration between UML and IEC 61131-3: New possibilities through object-oriented extensions," in 2009 Proc. 14th Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation, S. 1-6.

Zur Berechnung supremaler Teilsprachen für die ereignisdiskrete Regelung

Christine Baier

Lehrstuhl für Regelungstechnik
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstr. 7, 91052 Erlangen
Telefon: 09131-8527133
Fax: 09131-8528715
E-Mail: Christine.Baier@rt.eei.uni-erlangen.de

Schlüsselwörter: Ereignisdiskrete Systeme, Supervisory Control Theory, Supremale Teilsprachen

In der klassischen Supervisory Control Theory von [2] spielt die Berechnung von supremalen Teilsprachen mit definierten Eigenschaften, wie Steuerbarkeit oder Normalität, eine wichtige Rolle. Die supremalen Teilsprachen werden benötigt um das Verhalten des geschlossenen Regelkreises zu beschreiben und einen maximal zulässigen Supervisor zu erhalten, der diese Eigenschaften im geschlossenen Kreis gewährleistet. Neben der Theorie sind, gerade für die praktische Umsetzung in Form von ereignisdiskreten Modellen, Algorithmen für die Berechnung dieser Teilsprachen notwendig. Dabei ist die Ermittlung einer Teilsprache mit nur einer einzigen Eigenschaft oftmals problemlos möglich, da entsprechende Algorithmen zur Verfügung stehen. Trifft man allerdings auf die Kombination von mehreren Eigenschaften, so sind die Vorgehensweisen nur teilweise oder noch gar nicht untersucht worden. Es existiert beispielsweise ein Verfahren von [1] zur Berechnung von supremalen steuerbaren und normalen Teilsprachen, für den Fall, dass die Spezifikation abgeschlossen ist. Für andere Kombinationen, wie z.B. Steuerbarkeit, Normalität und Vollständigkeit ist noch kein Ansatz bekannt.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein iteratives Verfahren vorgestellt, das, basierend auf einem Vorgehen von [3], supremale steuerbare, normale und vollständige Teilsprachen ermittelt. Ein besonderes Merkmal des vorgestellten Verfahrens ist dabei die Tatsache, dass es im Vergleich zu anderen Algorithmen nicht auf abgeschlossene Sprachen beschränkt ist. Des Weiteren wird es in einer verallgemeinerten Form betrachtet, so dass es sich auch auf weitere Eigenschaften anwenden lässt, die gewisse Forderungen erfüllen, wie z.B. die Erhaltung unter Vereinigung.

Literatur:

- [1] R. D. Brandt, V. Garg, R. Kumar, F. Lin, S. I. Marcus, and W. M. Wonham. Formulas for calculating supremal controllable and normal sublanguages. *Systems and Control Letters*, 15:111–117, 1990.
- [2] Peter J. G. Ramadge and W. M. Wonham. The control of discrete event systems. *Proceedings of the IEEE*, 77(1):81–98, 1989.
- [3] T.-S. Yoo, S. Lafortune, and F. Lin. A uniform approach for computing supremal sublanguages arising in supervisory control theory. Technical Report, Department of EECS, University of Michigan, 2002.

Mehrgrößenregelung von Nanopositionier- und Messmaschinen

Stephan Zschäck *

* Fachgebiet Systemanalyse
Technische Universität Ilmenau
Postfach 100565
03677 96 4105
03677 96 1434
stephan.zschaeck@tu-ilmenau.de

Christoph Ament **

** Fachgebiet Systemanalyse
Technische Universität Ilmenau
Postfach 100565
03677 96 2814
03677 96 1434
christoph.ament@tu-ilmenau.de

Positionsregelung, Entkopplungsregelung: In der Nanotechnologie werden derzeit zur präzisen Vermessung und Manipulation von Objekten hochgenaue Positioniermaschinen verwendet, die es ermöglichen, eine Probe in allen drei räumlichen Achsen unter einem Messsystem zu positionieren. Sowohl die Position als auch die Winkel müssen dabei ständig mit Nanometerauflösung geregelt werden, um exogenen Einflüssen, wie beispielsweise Vibrationen, thermischen Ausdehnungen der mechanischen Komponenten, Schallwellen etc. aktiv entgegenzuwirken.

Am Sonderforschungsbereich (SFB) 622 an der TU Ilmenau wird aktuell das Nachfolgemodell der Nanomessmaschine 1 [1] (siehe Abbildung 1) entwickelt. Diese neuartige Nanopositionier- und Messmaschine (NPMM 200) besitzt einen Bewegungsbereich von $200 \times 200 \times 25$ mm³. Um diesen großen Bewegungsbereich konstruktiv realisieren zu können, werden zur Lagerung der einzelnen Bewegungsachsen Hochpräzisionskugelführungen eingesetzt. Dies führt zu einem nichtvermeidbaren Eintrag



Abbildung 1: NMM-1

von Reibung in das System [2], welche besonders bei sehr kleinen Geschwindigkeiten einen stark nichtlinearen Charakter besitzt. Aufgrund des großen Bewegungsbereiches der Maschine und der Tatsache, dass sie zur Manipulation von Objekten eingesetzt werden soll, ist es essentiell, dass die geforderte Genauigkeit auch bei einer Bewegung in allen sechs Achsen eingehalten wird.

Durch den mechanischen Aufbau der NPMM 200 sind die sechs Freiheitsgrade nicht voneinander entkoppelt. Eine besonders starke Kopplung von rotatorischen und translatorischen Freiheitsgraden existiert in der z-Achse der NPMM, deren Position und Verkippung mithilfe dreier Topfspulen beeinflusst wird.

Um einerseits den hohen messtechnischen Anforderungen gerecht zu werden und andererseits eine robuste Maschinenregelung zu ermöglichen, wird ein dynamisches Regelungskonzept vorgestellt, dessen zentraler Bestandteil ein Entkopplungsregler mit integrativen Verhalten ist [3].

Literatur:

- [1] T. Hausotte: Nanopositionier- und Nanomessmaschine, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2002

- [2] A. Amthor, S. Zschaeck, C. Ament: High precision position control using an adaptive friction compensation approach, Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 55, no. 1, pp. 274 – 278, 2010
- [3] P. L. Falb, W. A. Wolovich: Decoupling in the Design and Synthesis of Multivariable Control Systems. IEEE Trans. on Automatic Control 12 (1967), S.651-659

Qualitätsregelung für den Laser-Jet-Prozess

Zhang, Peiran *

* BIMAQ
Universität Bremen
Adresse: Linzer Str.13
Telefon: 0421 218 64639
Fax: 0421 218 64670
E-Mail: zha@bimaq.de

Prof. Gert, Goch **

** BIMAQ
Universität Bremen
Adresse: Linzer Str.13
Telefon: 0421 218 64600
Fax: 0421 218 64639
E-Mail: gg@bimaq.de

Schlüsselwörter: Qualitätsregelung, Mikroproduktion, Laser-Jet-Prozess

Für die Feinbearbeitung von Mikrokaltumform-Werkzeugen wird im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 747 „Mikrokaltumformen – Prozesse, Charakterisierung, Optimierung“ das Laser-Jet-Verfahren verwendet. Ein fokussierter Bearbeitungslaserstrahl wird koaxial zu einem Ätzmittelstrahl durch eine Düse auf die zu bearbeitende Werkstückoberfläche geführt. Die Erwärmung der Werkstückoberfläche durch den Laserstrahl aktiviert eine chemische Reaktion und führt so zu einem Materialabtrag [2]. Über einen XYZ-Positioniertisch wird ein Werkstückvorschub generiert, der komplexe Abtragsbahnen ermöglicht. Diese Abtragsbahnen können als Subprozesse betrachtet werden, welche – entsprechend überlagert – die Fertigung gewünschter Werkzeugkonturen ermöglichen.

Für die Qualitätsprüfung und Automatisierung wird eine Qualitätsregelung für den Laser-Jet-Prozess entwickelt. Die Steuerungen sowie Rückführungen der Qualitätsregelung untergliedern sich in drei unterschiedliche Ebenen: subprozess-übergreifende Ebene, prozessnahe Ebene und In-Prozess-Ebene [6] (*Abbildung 1*).

Die subprozess-übergreifende Ebene dient zur Auslegung der Positionen sowie Querschnitte der Abtragsbahnen, um die gewünschte Geometrie zu realisieren [1]. Dies wird als Bahnplanung bezeichnet und stellt eine Qualitätsvorgabe dar. Die Abweichung der gefertigten Werkzeuggeometrie von der Qualitätsvorgabe wird gemessen und in eine Datenbank aufgenommen. Somit wird der Feinbearbeitungsprozess ständig verbessert. Als Beispiel wird die Implementierung der Bahnplanung für eine Kantenverrundung im Vortrag vorgestellt [3,7].

Der Regler auf der untergeordneten, prozessnahen Ebene basiert auf einem Prozessvorhersagemodell. Mithilfe dieses prozessnahen Reglers werden die Prozessparameter für alle Abtragsbahnen festgelegt. Dies wird mittels eines Vorwärts-Modells und eines iterativen Optimierungsalgorithmus realisiert [9]. Auf Grund ihrer Komplexität werden die physikalischen Zusammenhänge zwischen Abtragsprofil und Prozessparameter in Form eines künstlich neuronalen Netzwerks beschrieben [5]. Die vorhergesagten Prozessparameter werden dem In-Prozess-Regelkreis als Führungsgröße zugeführt.

In der In-Prozess-Ebene werden die betrachteten Prozessparameter individuell geregelt. Dies erfolgt in einem echtzeitfähigen Prozessmodell innerhalb einer Matlab/Simulink Umgebung.

Die bearbeiteten Werkzeuge werden post-Prozess gemessen. Die Messergebnisse optimieren die Bahnplanung und das Prozessvorhersagemodell [4,8]. Eine In-

Prozess-Messtechnik für den Abtragsquerschnitt ist zurzeit in der Entwicklungsphase. Zusammen mit dieser In-Prozess-Messtechnik soll das vorgestellte Konzept eine In-Prozess-Qualitätsregelung für das Laser-Jet-Verfahren ermöglichen.

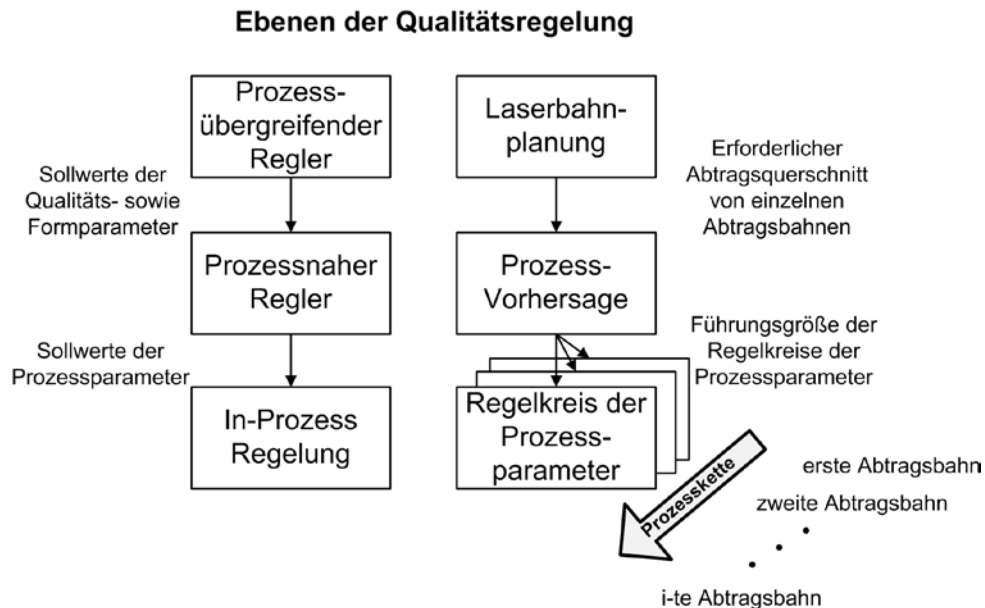


Abbildung 1: Qualitätsregelung des Laser-Jet-Prozesses

Literatur:

- [1] Cuypers, P.; von Freyberg, A.; Goch, G.; Stephen, A.; Vollertsen, F.; "Modellgestützte Prozessplanung zur laserchemischen Herstellung von Mikroumformwerkzeugen"; In: *tm - Technisches Messen* 77/4, pp. 229-236; 2010
- [2] Kray, D.; Fell, A.; Hopman, S.; Mayer, K.; Willeke, G. P.; Glunz, S. W.; "Laser Chemical Processing (LCP) - A versatile tool for microstructuring applications"; In: *Applied Physics A* 93, pp. 99-103; 2008
- [3] Kuhfuss, B.; Mouri, E.; Piwek, V.; "Vergleich charakteristischer Einflussgrößen beim Mikro- und Makrorundkneten"; In: *4. Kolloquium Mikroproduktion*, pp. 219-228; Bremen 2009
- [4] Lübke, K.; Sun, Z.; Goch, G.; "Algorithm for the combined approximation of continuously differentiable profiles with integrated automatic separation"; In: *Pisa, Italien 2010*
- [5] Nelles, O.; "Nonlinear System Identification"; pp. 264-269; Springer, 2001
- [6] Preifer, T.; "Qualitätsmanagement-Strategien, Methoden, Techniken"; Hanser, 2001
- [7] Stephen, A.; Vollertsen, F.; "Mechanisms and processing limits in laser thermochemical machining"; In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59/1, pp. 251-254; 2010
- [8] Wang, N.; v. Kopylow, C.; Lübke, K.; Goch, G.; Scholz-Reiter, B.; Kirchheim, A.; Albertin, E.; "Schnelle Qualitätsprüfung mikroumgeformter Bauteile"; In: *Industrie Management* 25/1, pp. 65-67; 2009
- [9] Zhang, P.; Cuypers, P.; Gerhard, C.; von Freyberg, A.; Stephen, A.; Goch, G.; Vollertsen, F.; "Control model for laser chemical machining of micro forming tools"; In: *2nd International CIRP Process Machine Interaction (PMI) Conference*, UBC, Vancouver 2010

Entwicklung eines Luftschiffes zu einem fliegenden Roboter

Pavol Bahník

František Jelenčíak

Michael Gerke

Lehrgebiet Prozesssteuerung und
Regelungstechnik
FernUniversität in Hagen
Philipp-Reis-Gebäude, Universitätsstraße 27,
D-58097 Hagen
+49 2331 987 1100
+49 2331 987 354
pavol.bahnik@fernuni-hagen.de

Schlüsselwörter: Luftschiff, Roboter, Regler, Autonom

Dieser Vortrag konzentriert sich auf die Darstellung der Entwicklung und des Einsatzes eines weitgehend autonom operierenden Luftschiffes der FernUniversität in Hagen.

Die Forschungsschwerpunkte an diesem Flugsystem sind auf folgende Bereiche fokussiert:



Abbildung 1: Luftschiff der FernUniversität in Hagen

- Erstellung eines mathematischen Modells für das nicht als Starrkörper (berücksichtigt die nicht feste Luftschiffhülle) beschreibbare Flugsystem.
- Erstellung eines mathematischen Modells der Flugmechanik, welches auch aerodynamische Vorgänge (wie z.B. das Abreißen der Luftströmung an der Luftschiffhülle) berücksichtigt. Die dazu entwickelte Methodik wird „Projective Equivalent Method - PEM“ genannt.
- Entwurf von Regelungsalgorithmen zur semi-autonomen Bedienung des Luftschiffes (z.B. Höhenregelung, RPY-Regelung).
- Aufbau eines Navigationssystems durch Multi-Sensorintegration und Datenfusion.
- Erweiterung der Regelungsalgorithmen um eine „Supervisory“-Regelungsstruktur für einen quasi autonomen Betrieb des Luftschiffes bei typischen Flugmanövern (z.B. Aufstieg, Landung).
- Aufbau einer Kommunikationsinfrastruktur zwischen den „on-board“- Systemen des Luftschiffes und der Leitzentrale am Boden für spezifische Einsatzszenarien.
- Systemintegration von Hardware, Betriebs-Software und Algorithmen.
- Entwurf von Bahnplanungsalgorithmen (off-line, on-line) zur Bestimmung von optimaler Flugtrajektorien für Luftschiff-Einsätze.
- Entwurf von Bildverarbeitungsalgorithmen zur Unterstützung der Navigation (z.B. optischer Fluss).

Die Systemintegration der Resultate dieser Forschungsschwerpunkte ermöglichte den Aufbau eines semi-autonom einsatzfähigen Luftschiffes („fliegender Roboter“), welches effektiv in verschiedenen Einsatzszenarien als mobile Sensor-Plattform

eingesetzt werden kann. In diesem Vortrag werden die bisher erreichten Ergebnisse zusammengefasst und vorgestellt.

Literatur:

- [1] Woodman Oliver O.J.: *An introduction to inertial navigation*. Technical Report 696. University of Cambridge, 2007
- [2] Titterton David H.: *Strapdown inertial navigation technology*. The American Institute of Aeronautics and Astronautics and the Institution of Electrical Engineers, 2000.
- [3] Nørgaard Magnus, Poulsen Niels K., Ravn Ole: *Advances in Derivative-Free State Estimation for Nonlinear Systems*. Technical University of Denmark, IMM-REP-1998-15, 2000.
- [4] Julier Simon J., Uhlmann Jeffrey K.: *A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems*. Proceedings of AeroSense. The 11th International Symposium on Aerospace/Defence Sensing, Simulation and Controls, Mar. 2000.
- [5] Foppe Karl: *Kombination von inertialen und satellitengestützten Beobachtungsverfahren zur ingenieurgeodätischen Überwachung von Brückenbauwerken*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 242, Hannover, 2001.
- [6] Kämpf Bernhard G.: *Flugmechanik und Flugregelung von Luftschiffen*. Institut für Flugmechanik und Flugregelung der Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, 2004.
- [7] Brockhaus Rudolf: *Flugregelung*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001.
- [8] Krause Thomas, Lima Pedro, Protzel Peter: *Flugregler für ein autonomes Luftschiff*. Autonome Mobile Systeme 2003: 18. Fachgespräch Karlsruhe. Hrsg. Dillmann, Wörn, Gockel
- [9] Enzinger Michael Franz: *A Modal Control Approach Based on a Minimum-order Dynamic Feedback*. Shaker Verlag, Aachen 2007.
- [10] Bittner Walter: *Flugmechanik der Hubschrauber*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.
- [11] Jelenciac F.: *Mathematical Modeling and Implementation of the Airship Navigation*. 18. International Conference on Process Control in Tatranska Lomnica, 2011.
- [12] Bahnik P., Pilka J.: *Data Management Architecture for Tele-operated UAV Systems*. 18. International Conference on Process Control in Tatranska Lomnica, 2011.

Tropische Algebren und Regelung von industriellen High-Throughput Screening Systemen

Thomas Brunsch *

Jörg Raisch **

* Fachgebiet Regelungssysteme, Technische Universität Berlin, Einsteinufer 17, 10587 Berlin, Telefon: 030 314-22999, Fax: 030 314-21137, {brunsch, raisch}@control.tu-berlin.de

** Fachgruppe System- und Regelungstheorie, Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg

Schlüsselwörter: High-Throughput Screening, Ereignisdiskrete Systeme, Dioid-Algebra, Residuentheorie

High-Throughput Screening (HTS) wird zur Analyse von chemischen und biologischen (bzw. bio-chemischen) Substanzen verwendet, wenn eine sehr große Anzahl an Proben in mehreren Arbeitsschritten untersucht werden sollen. Jede Probe durchläuft hierbei eine vorab definierte Sequenz von Bearbeitungsschritten. Dabei kann eine Probe dieselbe Ressource mehr als einmal „besuchen“ (re-entrant work flow). Desweiteren werden i.a. mehrere Proben gleichzeitig in einer HTS Anlage präsent sein.

In vorausgegangenen Arbeiten [1, 2] wurde eine Methode entwickelt, um einen optimalen Ablaufplan für HTS Analysen von Substanzen zu berechnen. Aus Komplexitätsgründen ist es jedoch nicht möglich, diese Berechnungen während der Analyse durchzuführen. Der optimale (statische) Ablaufplan wird daher offline, d.h. vor Beginn der Untersuchung, bestimmt. Allerdings kann man mit einem statischen Ablaufplan in keiner Weise flexibel auf unerwartete Ereignisse (z.B. Verzögerungen einzelner Untersuchungsschritte) reagieren. Dementsprechend können sich schon kleine Abweichungen vom offline berechneten „Fahrplan“ auf die gesamte nachfolgende Untersuchung auswirken (z.B. alle folgenden Aktivitäten verzögern). Da der Betrieb von HTS Anlagen mit sehr hohen Kosten verbunden ist, ist es erstrebenswert die Abweichungen vom vorab berechneten Ablauf durch eine Regelung so gering wie möglich zu halten.



Abbildung 1: HTS Anlage. CyBio AG, Jena

Die Bestimmung einer Regelung für HTS Prozesse ist jedoch in der „gewöhnlichen“ Algebra ein hochgradig nichtlineares Problem. Formuliert man dieses Problem allerdings in einer sog. tropischen Algebra erhält man ein lineares Modell. Als

tropische Algebra (bzw. Dioid-Algebra) bezeichnet man einen Halbring mit idempotenter Addition, d.h. eine nichtleere Menge \mathcal{D} mit zwei binären Verknüpfungen \oplus (Addition) und \otimes (Multiplikation), für die gilt, dass (\mathcal{D}, \oplus) eine kommutative Halbgruppe und (\mathcal{D}, \otimes) eine Halbgruppe ist. Der wahrscheinlich bekannteste idempotente Halbring ist die $(\max,+)$ -Algebra, bei der die Addition \oplus als Maximum und die Multiplikation \otimes als Addition der „gewöhnlichen“ Algebra definiert sind. Zur Modellierung von HTS Prozessen nutzen wir den idempotenten Halbring $\mathcal{M}_{in}^{ax}[\gamma, \delta]$, einen idempotenten Halbring von Potenzreihen in zwei Variablen mit Booleschen Koeffizienten und ganzzahligen Exponenten [3]. Der Vorteil dieses Halbrings ist die Möglichkeit, komplexe Abhängigkeiten zwischen Untersuchungsschritten unterschiedlicher Proben kompakt zu formulieren. Das entwickelte Modell eines HTS Prozesses beinhaltet die vom Nutzer definierten minimalen und maximalen Bearbeitungszeiten der einzelnen Untersuchungsschritte einer Probe. Zusätzlich enthält das Modell die optimale Sequenz von Untersuchungsschritten (ermittelt aus dem vorab bestimmten optimalen Ablaufplan) auf den einzelnen Ressourcen, nicht jedoch das offline bestimmte exakte Zeitschema des optimalen Ablaufplans.

Zur Bestimmung eines Reglers benötigt man die inverse Operation der Multiplikation. Diese existiert aber im Allgemeinen in idempotenten Halbringen nicht. Man kann jedoch eine „Pseudoinverse“ mit Hilfe der Residuentheorie [4] definieren, da die kleinsten oberen Schranken für die Lösungsmengen von $a \otimes x \leq y$ und $x \otimes b \leq y$ in idempotenten Halbringen eindeutig bestimmt sind. Durch Anwendung der Residuentheorie ist es möglich, eine Rückführung zu berechnen, die eine „Just-In-Time“ Strategie realisiert ohne den für die aufgetretene Störung größtmöglichen Durchsatz zu beeinträchtigen [5]. Das bedeutet, dass jeder Untersuchungsschritt des geregelten HTS Prozesses so spät wie möglich gestartet wird, ohne die Gesamtleistung des Systems zu verringern.

Der hier vorgestellte Regelungsansatz für High-Throughput Screening Anlagen ist im Rahmen des EU-FP7 Projekts *DISC* und in Kooperation mit der CyBio AG (einem führenden Hersteller von HTS Anlagen) und der Universität in Angers (Laurent Hardouin), Frankreich, entwickelt worden.

Literatur:

- [1] Mayer, E.; Raisch, J.: Time-optimal scheduling for high throughput screening processes using cyclic discrete event models. In: MATCOM – Mathematics and Computers in Simulation, 66(2-3):181–191, 2004.
- [2] Mayer, E.; Haus, U.-U.; Raisch, J.; Weismantel, R.: Throughput-Optimal Sequences for Cyclically Operated Plants. In: Discrete Event Dynamic Systems, 18(3):355–383, 2008.
- [3] Baccelli, F.; Cohen, G.; Olsder, G.J.; Quadrat, J.-P.: Synchronization and Linearity – An Algebra for Discrete Event Systems. Wiley, 1992.
- [4] Blyth, T.; Janowitz, M.: Residuation Theory. Oxford: Pergamon Press, 1972.
- [5] Brunsch, T.; Raisch, J.; Hardouin, L.: Modeling and control of high-throughput screening systems. In: Control Engineering Practice, 2011. doi: 10.1016/j.conengprac.2010.12.006.

Lineare und nichtlineare Ansätze zur Stabilisierung partikelbildender Prozesse in Wirbelschichten

Stefan Palis¹ Achim Kienle^{1,2}
stefan.palis@ovgu.de achim.kienle@ovgu.de

¹Otto von Guericke Universität, Magdeburg

²Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg

Die Wirbelschichtsprühgranulation ist von großer Bedeutung bei der Herstellung und Veredelung von pulverförmigen Feststoffen in der pharmazeutischen, chemischen und Lebensmittelindustrie. Bei diesem partikelbildenden Prozess wird ein fluidisiertes Feststoffbett mit einer Suspension besprüht. Durch die heiße Fluidisierungsluft verdunstet das Lösungsmittel und hinterlässt den gelösten Feststoff. Findet dieser Trocknungsprozess auf den Partikeln statt, so kommt es auf diese Weise zum Schichtenwachstum, d.h. zur Granulation. Andererseits führt eine Tropfentrocknung ohne Partikeloberfläche zur Bildung neuer Keime, d.h. zur Sprühtrocknung. Für eine kontinuierliche Prozessführung ist bei permanentem Produktabzug eine andauernde Keimbildung unbedingt notwendig. Um diese zu gewährleisten existieren u.a. zwei Konfigurationen:

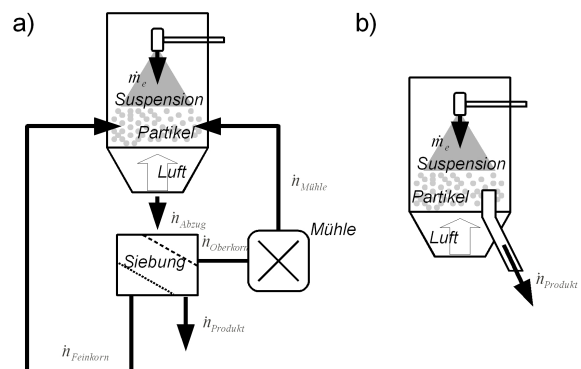


Abbildung 1: Externe (a) und interne (b) Klassierung

1. Wirbelschichtsprühgranulation mit externer Produktklassifikation, hier werden die Keime durch einen externen Sieb-Mahlkreislauf bereitgestellt (Abb. 1 a)).
2. Wirbelschichtsprühgranulation mit interner Produktklassifikation, hier werden die Keime durch anteilige Sprühtrocknung der eingedüsten Suspension gewonnen, wobei der klassierende Abzug ein sofortiges Abziehen der Keime verhindert (Abb. 1 b)).

Je nach Prozesskonfiguration und Betriebsparametern treten während des Produktionsprozesses ungewünschte Oszillationen in der Partikelgrößenverteilung und ihren Momenten μ_i auf [1, 2]. Diese nichtlinearen Oszillationen sind auf den Verlust der Stabilität der stationären Ruhelage zurückzuführen (Abb. 2). Zur Beseitigung dieses Problems bietet sich der Entwurf einer stabilisierenden Regelung an. Dabei handelt es sich aus theoretischer Sicht um ein schwieriges Problem, da die Dynamik der Partikelgrößenverteilung typischerweise durch Populationsbilanzen, d.h. nichtlineare, partielle Integrodifferentialgleichungen, beschrieben wird. In dieser Arbeit werden daher zwei Ansätze vorgeschlagen:

1. die Modellgleichungen werden diskretisiert und anschließend um eine Schar von Ruhelagen linearisiert. Für die Familie linearer, endlichdimensionaler Systeme kann anschließend unter Verwendung von Methoden der robusten Regelungstheorie ein stabilisierender Regler entworfen werden. Da sich innerhalb der Familie die Anzahl der Pole und Nullstellen in der rechten Halbebene ändern, bietet sich die Verwendung eines koprimen Fehlermodells an [3]. Zum Anfahren eines definierten Arbeitspunktes wird auf Grund des beschränkten Einzugsbereichs eine Vorsteuerung entworfen.
2. da der direkte Entwurf eines nichtlinearen Reglers zur Stabilisierung des Systems im Sinne einer L_p - oder Maximumsnorm nicht möglich ist, wird eine abgeschwächte Variante des Abstandsbegriffes, die sogenannte Diskrepanz, verwendet. Im Rahmen der diskrepanzbasierten Stabilitätstheorie ist der Entwurf eines stabilisierenden Reglers möglich [4].

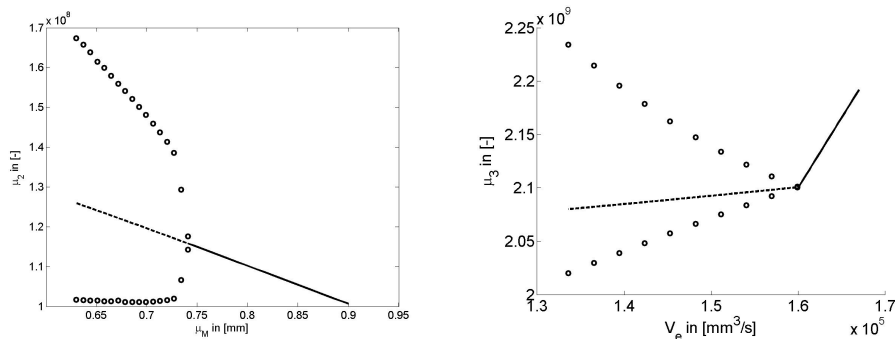


Abbildung 2: Bifurkationsdiagramme für externe (links) und interne (rechts) Klassifizierung (– stabile Ruhelage, - - instabile Ruhelage, ○ Amplitude der stabilen Grenzzyklen)

Literatur

- [1] R. Radichkov, T. Müller, A. Kienle, S. Heinrich, M. Peglow, L. Mörl, A numerical bifurcation analysis of continuous fluidized bed spray granulation with external product classification, Chem. Eng. and Proc., vol. 45, issue 10, Oct. 2006, pp. 826-837.
- [2] A.W. Vreman & C.E. van Lare & M.J. Hounslow, A basic population balance model for fluid bed spray granulation, Chem. Eng. Sci. 64, 2009, pp. 4389-4398.
- [3] S. Palis & A. Kienle, Stabilization of continuous fluidized bed spray granulation with external product classification, Chem. Eng. Sci. 2011, accepted.
- [4] S. Palis & A. Kienle, Stabilization of continuous fluidized bed spray granulation - a Lyapunov approach, In NOLCOS, 8th IFAC symposium on nonlinear control systems, Bologna, 2010.

Vorsteuerung der longitudinalen Eigendynamik von Balken auf Basis des örtlichen Eigenwertproblems

Dipl.-Ing. Silke Klose

rtm/ IAT
TU Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4
06151 16 3927
06151 16 6114
sklose@iat.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski

rtm/ IAT
TU Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4
06151 16 4167
06151 16 6114
ukonigorski@iat.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: Euler-Bernoulli-Balken, örtliches Eigenwertproblem, Vorsteuerung

Motiviert durch eine konkrete Anwendung im Bereich der Medizintechnik wird der modellbasierte Entwurf der longitudinalen Eigendynamik von flexiblen Balken thematisiert. Speziell wird ein Balken aus passivem Material betrachtet, der an einem Ende über einen Aktor in Resonanz angeregt wird. Der Balken wird als Euler-Bernoulli-Balken interpretiert, dessen Dynamik durch eine partielle Differentialgleichung beschrieben wird. Wegen des Randeingriffs liegen inhomogene Randbedingungen vor. Die Balkengeometrie beeinflusst somit die Balkendynamik und kann als Freiheitsgrad für deren Entwurf verwendet werden.

Im Fall der Transversaldynamik kann messtechnisch gezeigt werden, dass die Wurzeln der Eigenwerte und die Eigenfunktionen des örtlichen Eigenwertproblems (EWP) des einseitig eingespannten Euler-Bernoulli-Balkens auch bei Randeingriff die Resonanzfrequenz sowie die dazugehörige Schwingungsform des Balkens sehr gut approximieren. Dieses Ergebnis kann auf die Longitudinaldynamik übertragen werden, weshalb der Entwurf der Eigendynamik auf Basis dieses EWP erfolgt. Hierbei wird der Systemparameter Balkenquerschnitt im EWP als Systemeingang und die Eigenfunktion einer Mode als Systemausgang definiert. Aus regelungstechnischer Sicht wird somit die Dynamikvorgabe als Vorsteuerungsproblem interpretiert, wobei die Eigenfunktion die vorgegebene Trajektorie und der Balkenquerschnitt die gesuchte Steuerfunktion darstellen. Das EWP entspricht dann einem nichtflachen, nichtlinearen und nicht eingangsaffinen System in der Ein-Ausgangsnormalform. Aus dieser Darstellung heraus kann eine analytische Berechnungsvorschrift für die Steuerfunktion nach dem inversionsbasierten Vorsteuerungsentwurf hergeleitet werden, die im vorliegenden Fall durch hebbare Singularitäten in der Internen Dynamik und durch das nicht eingangsaffine Systemverhalten erschwert wird. Letzteres schließt eine Trajektorienfolgeregelung mit linearer Fehlerdynamik aus. Aus der analytischen Steuerfunktion ist eine charakteristische Gleichung für die Eigenfrequenz ableitbar.

Es kann nun für jede Mode die Eigenfunktion und die Eigenfrequenz gezielt vorgegeben werden, wobei die Eigendynamik des homogenen Balkens als Referenzsystem dient. Insbesondere kann die Lage der Schwingungsknoten und -bäuche sowie die Absolutbeträge der Schwingungsmaxima in Relation zum homogenen Balken explizit vorgegeben werden. Das Ergebnis der Vorsteuerung ist ein Balkenquerschnittsverlauf, der die vorgegebene Dynamik gewährleistet. Eine Verifikation der

Ergebnisse erfolgt durch Simulation des EWP's mit dem berechneten Balkenquerschnittsverlauf als vorgegebenen Systemparameter.

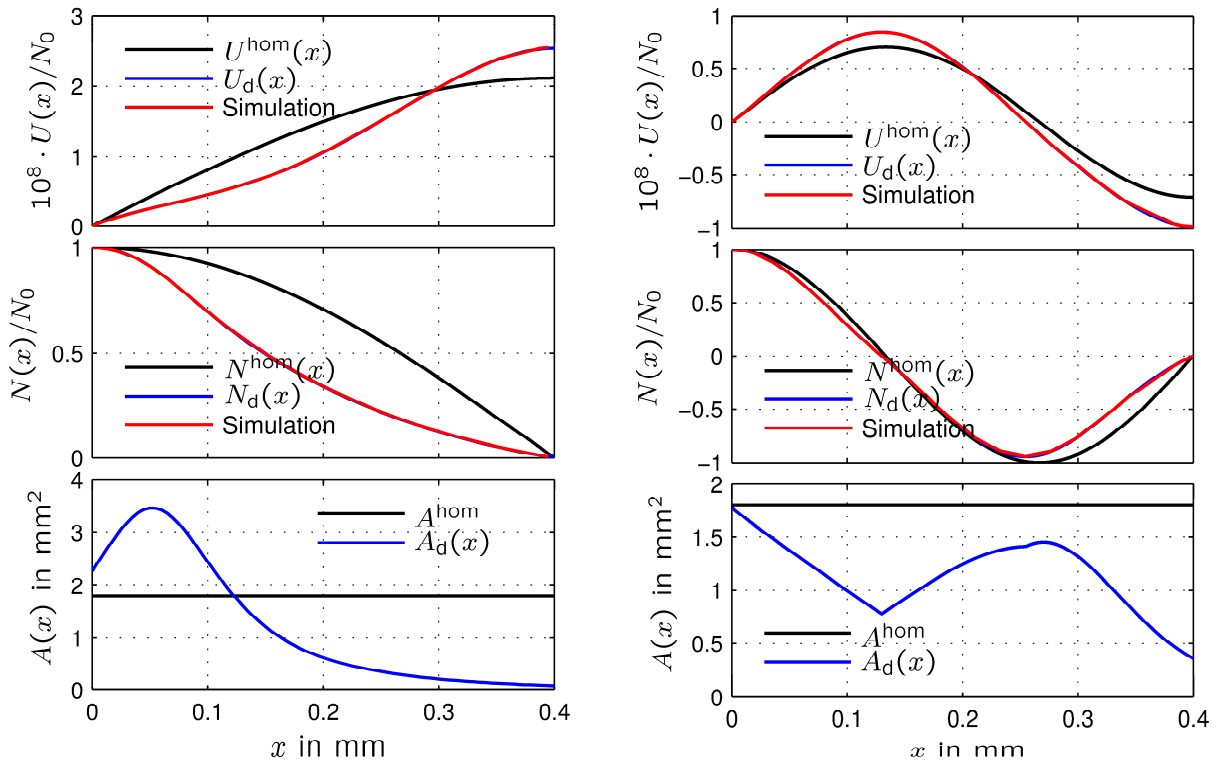


Abbildung 1: Ergebnisse der Vorsteuerung der ersten zwei Eigenfunktionen $U_d(x)$ (blau) relativ zum Referenzsystem $U^{hom}(x)$ (schwarz); Verifikation durch Simulation des EWP's mit $A_d(x)$ als Systemparameter (rot); Die roten Verläufe sind mit den Blauen deckungsgleich

Literatur:

- [1] Boyd, J. P.; *Chebyshev and Fourier Spectral Methods*, Dover Publications, 2. Auflage, Mineola, 2001
- [2] Dahmen, W., Reusken, A.; *Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Springer-Verlag, 2. Auflage, Berlin, 2008
- [3] K. Graichen, V. Hagenmeyer, M. Zeitz; *A new approach to inversion-based feed-forward control design for nonlinear systems*, Automatica, Vol. 41, pp. 2033-2041, 2005
- [4] K. Graichen, V. Hagenmeyer, M. Zeitz; *Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf mit Ein- und Ausgangsbeschränkungen*, at-Automatisierungstechnik, Vol. 54, pp. 187-198, 2006
- [5] S. Klose, U. Konigorski; *Modelling of Longitudinal Dynamics of Beams with Variable Cross-Sectional Area*, Proceedings of European Control Conference, Budapest, Hungary, 2009, pp. 862-867
- [6] S. Klose; *Systemtheoretische Analyse und Entwurf der modalen Eigendynamik von flexiblen Balken mit variablem Querschnittsverlauf auf Basis des örtlichen Eigenwertproblems*, D 17, Darmstädter Dissertationen, Eingereicht November 2011
- [7] L. Meirovitch; *Principels and Techniques of Vibrations*, Prentice Hall, New Jersey, 1997

Datenbasierter Entwurf fehlertoleranter Regelungssysteme

Adel Haghani *

* Automatisierungstechnik und komplexe Systeme
Universität Duisburg-Essen
Bismarckstraße 81, BB
47057 Duisburg
Telefon: +49-203 379 3387
Fax: +49-203 379 2928
E-Mail: adel.haghani@uni-due.de

Steven X. Ding**

** Automatisierungstechnik und komplexe Systeme
Universität Duisburg-Essen
Bismarckstraße 81, BB
47057 Duisburg
Telefon: +49-203 379 3386
Fax: +49-203 379 2928
E-Mail: steven.ding@uni-due.de

Schlüsselwörter: Fehlertolerante Regelung (FTR), datenbasierte Methoden, Fehlerdiagnose und Identifikation (FDI), Beobachterentwurf, Unterraummethoden, Paritätsraum

Der klassische Entwurf fehlertoleranter Regelungen (FTR)-Architekturen basiert auf einem quantitativen Prozessmodell, welches durch physikalisches und mathematisches Wissen über den Prozess hergeleitet wird. Es erweist sich jedoch als schwierig solche Modelle für komplexe Systeme zu erlangen, wie sie in der heutigen Prozessindustrie zum Einsatz kommen. Andererseits werden große Mengen an Prozessdaten aufgezeichnet und in Datenbanken gespeichert. Diese stehen somit der Prozessüberwachung und -optimierung zur Verfügung. Daraus resultiert der Bedarf an datenbasierte FTR-Systemen, um zuverlässige Performanz sowie Produktqualität und effizienten Betrieb zu gewährleisten.

Dieser Beitrag soll ein Schema für den Entwurf und die Erstellung einer FTR-Architektur vorstellen, welches auf verfügbaren Prozessdaten basiert. Der Kern des vorgeschlagenen Verfahrens ist eine beobachterbasierte Formulierung der Youla-Parametrisierung aller stabilisierenden Regler, mit eingebettetem Residuengenerator. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Realisierung fortgeschrittener FDI/FTR-Verfahren.

Die hier vorgeschlagene FTR-Architektur basiert auf einer sogenannten *generalized internal model control* (GIMC) Struktur [1], deren Kern die Rekonstruktion des Standardregelkreises ist. GIMC resultiert in einer FTR-Architektur, auf der weiterführend Fehlerdetektion und -identifikation sowie fehlertolerante Regelung realisiert werden können, siehe auch Abbildung 1.

Alternativ haben Ding et al. in [2] die sogenannte extended IMC Struktur (EIMC) vorgeschlagen deren Aufbau aus der Beziehung zwischen Regelkreis und eingebettetem Residuengenerator motiviert ist. Es wurde gezeigt, dass alle (nach Youla parametrisierten) stabilisierenden Regler äquivalent in einer beobachterbasierten Residuengeneratorform realisiert werden können. Das in dieser Struktur vorhandene Residuensignal kann dabei zur FDI oder FTC verwendet werden. Basierend auf diesem Ergebnis wird hier eine alternative FTC Struktur (siehe Abbildung 2) vorgeschlagen deren Kern der Zustandsbeobachter ist.

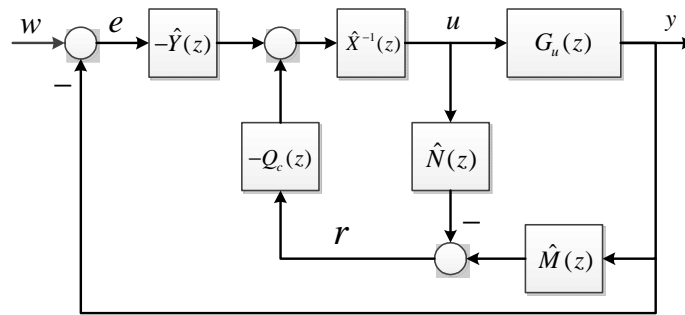


Abbildung 1 vorgeschlagene GIMC Architektur

Die vorliegende Struktur (Abb. 2) ermöglicht das fehlertolerante Reglerdesign ohne Modellidentifikation im Sinne der Zustandsraummatrizen. Vielmehr werden die den Residuengenerator zugrunde liegenden Paritätsraummatrizen aus den verfügbaren Prozessdaten identifiziert [3].

Folglich liegt der Fokus des Entwurfs auf der direkten Berechnung der Zustandsrückführmatrix F sowie des Designs der Beobacherverstärkung L aus Messdaten. Fehlertoleranz kann durch Onlineidentifikation der Paritätsraummatrizen, basierend auf Daten vom geänderten Prozess, und anschließende Neuberechnung der Rückführmatrix F erreicht werden.

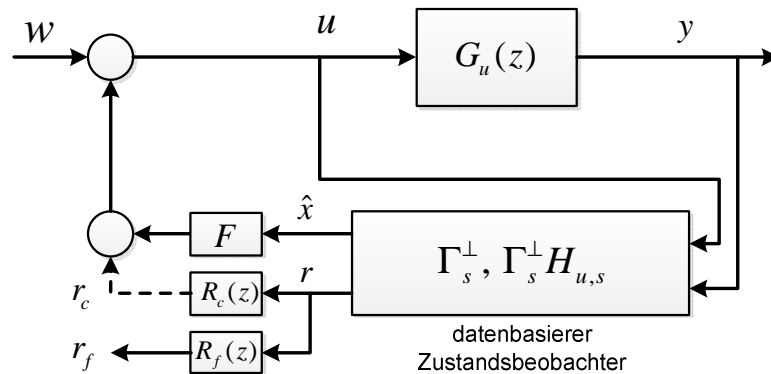


Abbildung 2 Die fehlertolerante Architektur

Literatur:

- [1] Zhou, K. & Ren, Z; *A new controller architecture for high performance, robust, and fault-tolerant control*. Automatic Control, IEEE Transactions on 46, 1613-1618 (2001).
- [2] Ding, S.X. Yang, G. Zhang, P. Ding, E.L. Jeansch, T. Weinhold & N. Schultalbers, M. *Feedback Control Structures, Embedded Residual Signals, and Feedback Control Schemes With an Integrated Residual Access*. Control Systems Technology, IEEE Transactions on 18, 352-367 (2010).
- [3] Ding, S.X., Zhang, P., Naik, A., Ding, E.L. & Huang, B. *Subspace method aided data-driven design of fault detection and isolation systems*. Journal of Process Control 19, 1496-1510 (2009).

Eine objektorientierte Methode zur modellbasierten Fehlererkennung und -isolation für komplexe Systeme

Stefan Simon und Steven Liu

Lehrstuhl für Regelungssysteme
Technische Universität Kaiserslautern
Erwin-Schrödinger-Straße 12
67663 Kaiserslautern
Tel.: +49 631 205 2820|4535
Fax: +49 631 205 4205
E-Mail: simon|sliu@eit.uni-kl.de

Schlüsselwörter: Modellbasierte Fehlerdiagnose und -isolation, Objektorientierte Modellierung, Komplexe Systeme

Ein komplexes System besteht aus mehreren Teilsystemen, welche aus unterschiedlichen physikalischen Domänen stammen. Zwischen diesen Teilsystemen besteht eine starke Interaktion, d.h. die Funktionalität eines Teilsystems steht in starker Abhängigkeit der jeweiligen Funktionalität der anderen Teilsysteme. Zudem kommt eine hohe Systemvariabilität, d.h. die Teilsysteme können in verschiedenen Systemkonfigurationen kombiniert werden. Ein modernes Nutzfahrzeug ist ein Beispiel für ein komplexes System, da hier mechanische, elektrische, pneumatische und auch häufig hydraulische Teilsysteme integriert sind. Darüber hinaus ist ein Nutzfahrzeug in verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen verfügbar. So besitzen Baustellenfahrzeuge, Müllfahrzeuge und Standard Lastkraftwagen gemeinsame Teilsysteme. Die Anzahl der spezialisierten Teilsysteme wie z.B. hydraulische Pressen oder Arbeitsmaschinen ist jedoch variabel und von Fahrzeug zu Fahrzeug verschieden.

Aus Sicht der technischen Diagnose stellt diese Komplexität eine Herausforderung dar, denn die starke teilsystemübergreifende Interaktion der Funktionalität führt dazu, dass lokale Fehler einzelner Teilsysteme weit über die Teilsystemgrenzen hinaus wirken. Somit zeigen auch fehlerfreie Teilsysteme ein fehlerhaftes Verhalten. In einer solchen Fehlersituation liefern lokale Diagnosemethoden, d.h. Methoden welche auf ein Teilsystem beschränkt sind, Fehlalarme. Die manuelle Entwicklung eines modellbasierten Diagnosesystems für das Gesamtsystem ist sehr aufwändig. Diesem Aufwand steht die geringe Wiederverwertbarkeit von konventionellen signalbasierten Modellen entgegen, d.h. ein Diagnosesystem, welches für eine spezielle Systemkonfiguration entwickelt wurde, verliert bei einer Variation in der Systemkonfiguration seine Gültigkeit und es ist ein aufwändiger Anpassungsprozess erforderlich.

In der Simulationstechnik hat sich bei komplexen Systemen eine objektorientierte Vorgehensweise durchgesetzt, das bedeutet für jedes Teilsystem wird ein Modell in Form eines Objektes erstellt, diese Objekte werden in einer Bibliothek gespeichert [1]. Abhängig von der betrachteten Systemkonfiguration kann aus dieser Bibliothek ein Gesamtmodell erstellt werden, die dafür erforderlichen Umformungen und Transformationen erfolgen automatisch. Objektorientierte Modelle zeichnen sich

durch Flexibilität und eine hohe Wiederverwertbarkeit aus, zudem sind sie in nahezu allen technischen Domänen anwendbar da sie auf physikalischen Analogien basieren.

In dieser Arbeit wird der objektorientierte Ansatz auf modellbasierte Fehlerdiagnose und -isolierung übertragen, d.h. es wird eine Bibliothek von Diagnoseobjekten erstellt welche zu einem Gesamtdiagnosesystem kombiniert werden. Die objektorientierte Diagnoseprozedur

ist in Abb. 1 veranschaulicht. In dem ersten Schritt wird für jedes Teilsystem ein objektorientiertes Modell erstellt. Danach wird basierend auf diesen Modellobjekten ein Diagnoseobjekt entwickelt. In dem letzten Entwurfs-

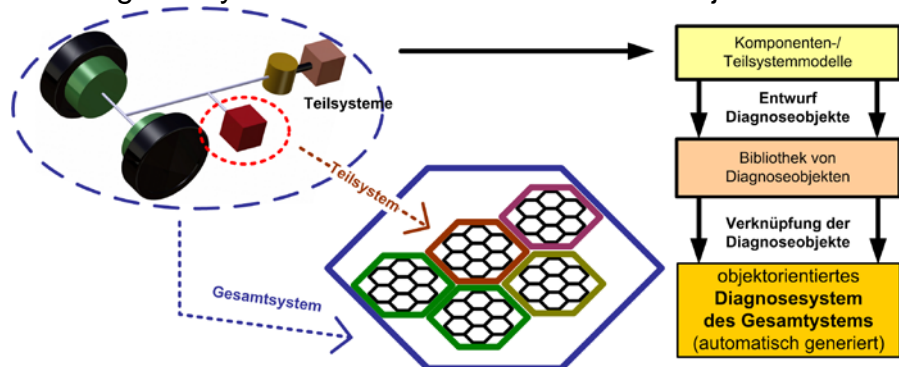


Abbildung 1: Prinzip der objektorientierten Diagnose

schritt werden in Abhängigkeit der zu analysierenden Teilsysteme die Diagnoseobjekte zu einem Gesamtdiagnosesystem verknüpft. Nach der Auswertung des Gesamtdiagnosesystems wird der Fehlerort auf ein Teilsystem eingeschränkt. Diese Methode kann auf mehrere Detaillierungsstufen erweitert werden, d.h. nach Isolierung des fehlerhaften Teilsystems kann die Entwurfs- und Diagnoseprozedur erneut auf das fehlerhafte System angewendet werden. Dadurch ist eine tiefgehende Fehlerisolierung innerhalb des Teilsystems möglich und der Detaillierungsgrad der Diagnose kann je nach Anwendungs- und Fehlerfall variiert werden.

Als objektorientierte Modellierungsmethode wird der Bond-Graph Ansatz gewählt. Er bildet eine Grundlage der objektorientierten Modellierung mit Modelica [1] und ist zudem eng mit der Regelungs- und Systemtheorie verknüpft [2]. Dies ermöglicht neben der reinen objektorientierten Modellierung auch den direkten Beobachterentwurf anhand der objektorientierten Modelle [3]. Die Strukturinformation des Bond-Graphen wird zur genauen Fehlerlokalisierung genutzt. Außerdem können Systemeigenschaften wie Stabilität, Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit direkt an dem Bond-Graph analysiert werden.

Literatur:

- [1] OTTER, M.: *Objektorientierte Modellierung physikalischer Systeme* (Artikelserie) In: *at – Automatisierungstechnik*, 47-48, (1999-2000)
- [2] GAWTHROP, P.; BEVAN, G.: *Bond-Graph modeling* In: *IEEE Control Systems Magazine*, 27 (2007), Nr. 2, S. 24 – 45
- [3] PICHARDO-ALMARZA, C.; RAHMANI, A; DAUPHIN-TANGUY, G.: *Luenberger observers for linear time-invariant systems modeled by bond-graphs* In: *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 12 (2006), Nr. 2-3, S. 219-234

Strukturvariable Anti-Windup-Methoden mittels impliziter Ljapunov-Funktionen

Andreas Ortseifen *

Jürgen Adamy **

Technische Universität Darmstadt, Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik
Landgraf-Georg Straße 4, 64283 Darmstadt

* Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik

+49 (0)6151 16-5329

+49 (0)6151 16-2507

ortseifen@rtr.tu-darmstadt.de

** Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik

+49 (0)6151 16-3442

+49 (0)6151 16-2507

jadamy@iat.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: Stellgrößenbegrenzung, Anti-Windup, strukturvariabel, implizite Ljapunov-Funktionen, konvexe Optimierung, LMI

Jedes reale Regelsystem ist mit einer Beschränkung der Stellamplitude behaftet. Dieses physikalische Limit muss beim Entwurf des Regelkonzeptes berücksichtigt werden, da es sonst zu einem unerwünschtem Verhalten des Systems – bis hin zur Instabilität – kommen kann.

Neben der Möglichkeit die Stellgrößenbeschränkung während des Reglerentwurfes direkt zu berücksichtigen, hat sich ein Vorgehen in zwei Schritten etabliert: Zuerst wird die Stellgrößenbeschränkung ignoriert und ein Regler für die unbeschränkte Regelstrecke entworfen. In einem zweiten Schritt wird der Regelkreis um eine strukturelle Maßnahme erweitert, die Stabilität und eine hohe Regelgüte garantiert, falls die Stellgröße sättigt. Diese Maßnahme wird mit Anti-Windup (AW) bezeichnet.

Ein Vorteil der AW-Methodik ist, dass sich der Regler im ersten Entwurfsschritt mit einem beliebigen Verfahren sehr einfach entwerfen lässt. Das Verhalten des unbeschränkten Systems, das dem Kleinsignalverhalten des beschränkten Systems entspricht, kann somit nahezu optimal eingestellt werden. Deshalb ist das Ziel einer AW-Maßnahme das Kleinsignalverhalten nicht zu stören und im Sättigungsfall ein annähernd unbeschränktes Systemverhalten zu garantieren.

Die typische Anti-Windup-Architektur ist in Abbildung 1 dargestellt. Da der Eingang des AW-Blocks der Differenz von Reglerausgang und Streckeneingang entspricht, wird die AW-Maßnahme nur im Sättigungsfall aktiv. Die zwei Ausgänge des AW-Blocks beeinflussen den Reglereingang und -ausgang. Das Ziel beim Entwurf der AW-Strategie ist es, die Dynamik des AW-Blocks festzulegen. Eine Zusammen-

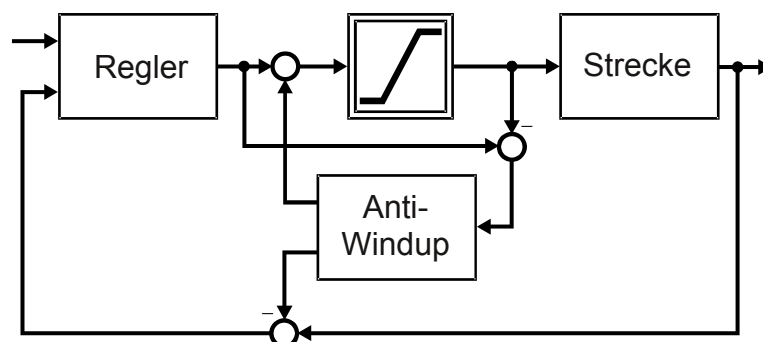


Abbildung 1: Anti-Windup-Architektur.

fassung der modernen linearen AW-Strategien für lineare Regelstrecken mit Stellbegrenzungen gibt der Artikel [4]. In diesem Beitrag werden modellbasierte AW-Methoden behandelt, die ein Modell der Strecke beinhalten. Das Entwurfsproblem reduziert sich dann auf die Stabilisierung dieses Modells unter Störungen durch eine lineare Zustandsrückführung.

Der Einfachheit einer rein linearen Zustandsregelung steht ihre mäßige Regelgüte gegenüber. Durch strukturvariable Zustandsrückführungen lässt sich dieses Problem beheben. Die seit langem bekannte Grundidee ist, immer aggressivere Zustandsregler zu aktivieren, je näher die Systemzustände dem Ursprung kommen [6]. Ändern sich die Parameter der Zustandsregler kontinuierlich, d.h. eine harte Umschaltung wird vermieden, so spricht man von weichen strukturvariablen Regelungen [1]. Im Kontext von Anti-Windup wurde dies erstmals in [3] realisiert.

Dieser Beitrag stellt ein neues, auf impliziten Ljapunov-Funktionen basierendes AW-Konzept vor, das auf der in [1,2,6,7] entwickelten und in [5] vereinfachten impliziten weich strukturvariablen Regelung aufbaut. Die Hauptvorteile gegenüber dem existierenden weich strukturvariablen AW-Ansatz [3] sind die schlankere Struktur (d.h. weniger Parameter), der unkomplizierte konvexe LMI-Entwurf und die einfach zu implementierende Regelstrategie bei vergleichbarer Regelgüte. Diese Punkte sind vor allem im Hinblick auf die Praxistauglichkeit wichtig. Verglichen mit linearen AW-Methoden wird eine deutlich bessere Regelgüte erzielt, was anhand eines Beispiels demonstriert wird.

Literatur:

[1] Adamy, J. und A. Flemming: Soft variable-structure controls: a survey. *Automatica*, 40(11):1821-1844, 2004.

[2] Domont-Yankulova, D.: Entwurf strukturvariabler Regelungen mittels linearer Matrixungleichungen. Doktorarbeit, TU Darmstadt, Darmstadt, 2010.

[3] Galeani S., S. Onori und L. Zaccarian: Nonlinear scheduled control for linear systems subject to saturation with application to anti-windup control. In: Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, 2007.

[4] Galeani S., S. Tarbouriech, M. Turner and L. Zaccarian: A Tutorial on modern Anti-Windup design. *European Journal of Control*, 15(3-4):418-440, 2009.

[5] Jasiewicz, B., J. Adamy und D. Domont-Yankulova: Vereinfachte schnelle Regelung von linearen Systemen mit Stellgrößenbeschränkungen. *at – Automatisierungstechnik*, 59(2):84-93, 2011.

[6] Kiendl H. und G. Schneider: Synthese nichtlinearer Regler für die Regelstrecke const/s^2 aufgrund ineinandergeschachtelter abgeschlossener Gebiete beschränkter Stellgröße. *Regelungstechnik und Prozeßdatenverarbeitung*, 20(7):289-296, 1972.

[7] Lens, H., J. Adamy und D. Domont-Yankulova: A fast nonlinear control method for linear systems with input saturation. *Automatica*, 47(4):857-860, 2011.

Optimale Steuerung nichtlinearer Systeme mittels der Differentiellen Dynamischen Programmierung

Shaady Khatab*

* Heinz-Nixdorf Institute
Universität Paderborn
Pohlweg 98

+49 52 51-60 55 55

+49 52 51-60 55 79

shaady.khatab@hni.uni-paderborn.de

Schlüsselwörter: Nichtlineare optimale Steuerung, Dynamische Programmierung, Optimierungsalgorithmen

Der Einsatz optimaler Steuerungen in technischen Systemen beinhaltet viele Vorteile, die Umsetzung in eine praktikable Regelungsstrategie stellt jedoch eine Herausforderung dar. Verfahren der optimalen Steuerung benutzen üblicherweise Optimierungsalgorithmen, die für allgemeine Optimierungsprobleme entwickelt wurden. Dabei werden praxisrelevante Problemstellungen wie Modellunsicherheiten und begrenzte zur Verfügung stehende Rechenleistung nicht berücksichtigt. Gleichzeitig wird die besondere Struktur des optimalen Steuerungsproblems nicht ausgenutzt.

Es ist seit Mitte der fünfziger Jahre bekannt, dass diskrete optimale Steuerungsprobleme mit Hilfe des Prinzips von Bellman in viele kleinere Probleme unterteilt werden können [2]. Die sukzessive Lösung der Teilprobleme statt der Lösung des Gesamtproblems führt zu effizienteren Optimierungsalgorithmen und erlaubt zudem eine Art von Rückkopplung zwischen den Ein- und Ausgängen des Systems. Die differentielle dynamische Programmierung [3] kombiniert das Prinzip von Bellman mit gradientenbasierten Optimierungsverfahren, die sich zur Lösung von allgemeinen Optimierungsproblemen bewährt haben [1]. Der dabei entstehende Algorithmus liefert einen optimalen 2-Freiheitsgrad Regler mit einer Steuerung und einem unterlagerten Zustandsregler.

Nach einer Vorstellung des Verfahrens werden die Vorteile anhand von bekannten Beispielen aus der Regelungstechnik diskutiert. Einzelheiten zur Reduktion des Rechenaufwands und Erhöhung der Anwendbarkeit des Verfahrens werden ebenfalls vorgestellt.

Literatur:

- [1] Fletcher R. (1980). Practical Methods of Optimization. John Wiley & Sons
- [2] Larson R.E, Casti J.L. (1978). Principles of Dynamic Programming. Marcel Dekker Inc.
- [3] Receding Horizon Differential Dynamic Programming, Y. Tassa, T. Erez, B. Smart

Bewegungsplanung und Sicherheitsbewertung in dynamischen Umgebungen

Daniel Althoff *

Dirk Wollherr**

Martin Buss ***

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik
Technische Universität München
Theresienstraße 90 – 80333 München
Tel.: +49-89-289-28395
Fax.: +49-89-289-28340
da@tum.de*, dw@tum.de**, mb@tum.de***

Schlüsselwörter: Bewegungsplanung, Sicherheitsbewertung

Dieser Vortrag behandelt die Problematik der Bewegungsplanung in unsicheren und dynamischen Umgebungen sowie die Sicherheitsbewertung der resultierenden Trajektorien. Bei der Bewegungsplanung werden mögliche Rückwirkungen der geplanten Trajektorie auf das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer berücksichtigt. Dadurch kann der mögliche Planungsraum vergrößert werden, was speziell in engen Umgebungen zu einer deutlichen Steigerung der Qualität des Planungsergebnisses führt oder sogar erst eine Lösung zulässt. Dazu wird ein erster Ansatz aus der Spieltheorie vorgestellt.

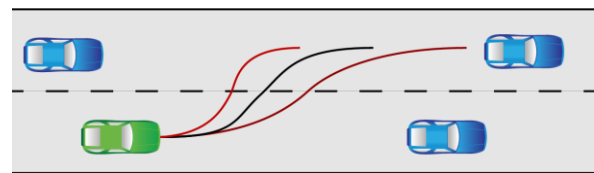


Abbildung 1: Sicherheitsbewertung einer Verkehrssituation

Dadurch kann der mögliche Planungsraum vergrößert werden, was speziell in engen Umgebungen zu einer deutlichen Steigerung der Qualität des Planungsergebnisses führt oder sogar erst eine Lösung zulässt. Dazu wird ein erster Ansatz aus der Spieltheorie vorgestellt. Als Kriterium für die Sicherheitsbewertung von Trajektorien wird die *Overall Collision Probability* [1] verwendet. Diese setzt sich zusammen aus den Kollisionswahrscheinlichkeiten während und jenseits des Planungshorizontes der Trajektorie. Zur Bewertung jenseits des Planungshorizontes werden die sogenannten *Inevitable Collision States* [2,4] sowie deren probabilistische Erweiterung, die *Probabilistic Collision States* [3] verwendet.

Die Evaluierung der vorgestellten Konzepte wird anhand von Szenarien aus der mobilen Robotik und dem hochautomatisierten Fahren durchgeführt. Dazu werden die vorgestellten Verfahren in einen *Model Predictive Control* Ansatz integriert.

Literatur:

[1] D. Althoff, J. J. Kuffner, D. Wollherr and M. Buss, *Safety Assessment of Robot Trajectories for Navigation in Uncertain and Dynamic Environments*, Autonomous Robots (Special Issue on Motion Safety for Robots), 2011.

[2] T. Fraichard and H. Asama, Inevitable Collision States. A Step towards safer robots?, *Advanced Robotics*, 2004.

[3] D. Althoff, M. Althoff, D. Wollherr and M. Buss, Probabilistic Collision State Checker for Crowded Environments, *Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2010.

[4] D. Althoff, C. N. Brand, D. Wollherr, M. Buss, *Computing Unions of Inevitable Collision States and Increasing Safety to Unexpected Obstacles*, *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2011.

Explizite modellprädiktive Regelung nichtlinearer Systeme

Moritz Schulze Darup*

Martin Mönnigmann**

* Regelungstechnik und Systemtheorie

Ruhr-Universität Bochum

Universitätsstraße 150

Tel.: 0234 32 26350

Fax.: 0234 32 14155

Moritz.SchulzeDarup@rub.de

** Regelungstechnik und Systemtheorie

Ruhr-Universität Bochum

Universitätsstraße 150

Tel.: 0234 32 24060

Fax.: 0234 32 14155

Martin.Moennigmann@rub.de

Schlüsselwörter: Explizite modellprädiktive Regelung (EMPC), nichtlineare Systeme, Erreichbarkeits-Analyse, Intervall-Arithmetik

Die lineare modellprädiktive Regelung (MPC) und die nichtlineare MPC (NMPC) sind in der Praxis etabliert. Theoretische Fortschritte, verbesserte Algorithmen und wachsende Rechenleistung tragen dazu bei, dass MPC und NMPC zu immer schnelleren Abtastzeiten vordringen. Eine neuere Methodenklasse ist die der expliziten MPC (EMPC) [1]. EMPC kann für sehr schnelle Abtastzeiten und bei strengen Echtzeitanforderungen vorteilhaft sein, weil zur Laufzeit des Reglers kein numerisches Optimierungsproblem gelöst werden muss. Vereinfacht gesagt wird die Optimalsteuerungsaufgabe, die bei der MPC in jedem Zeitschritt erneut gelöst werden muss, in der EMPC ersetzt durch ein Optimierungsproblem, das zwar aufwändiger ist, aber nur *einmal vor der Laufzeit der Regelung* gelöst werden muss.

Im Falle linearer zeitdiskreter zeitinvarianter Strecken mit linearen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsbeschränkungen und positiv definiten quadratischer Gütefunktion ist die zu lösende Optimierungsaufgabe ein parametrisches quadratisches Programm, das vor der Laufzeit des Reglers exakt gelöst werden kann. Seine Lösung liefert ein stückweise affines Stellgesetz $u(x)$, dessen Stücke auf paarweise disjunkten konvexen Polytopen im Zustandsraum definiert sind [1]. Die explizite MPC trägt ihren Namen, weil sich das gesuchte Regelgesetz im Prinzip als analytische („explizite“) Formel für ein stückweise affines $u(x)$ hinschreiben lässt, wenngleich auch die Zahl der Zustandsraumpolytope groß werden kann ($> 10^3$ schon für akademische Beispiele).

Im Fall der nichtlinearen MPC kann ein explizites Stellgesetz $u(x)$ i.Allg. nicht gefunden werden, weil für die entsprechenden nichtlinearen parametrischen Programme noch keine praxisrelevanten Lösungsverfahren existieren. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Approximation expliziter modellprädiktiver Regelgesetze für den nichtlinearen zeitdiskreten Fall vorgestellt. Ein naheliegender Ansatz basiert darauf, das Optimalsteuerungsproblem für eine begrenzte Anzahl von Anfangsbedingungen x_i zu ermitteln und mit Hilfe dieser Stützstellen ein approximiertes Regelgesetz $\tilde{u}(x)$ zu bilden (siehe z.B. [3, 4]). Dabei kann für $\tilde{u}(x)$

die Einhaltung der Beschränkungen und die Stabilität i.Allg. nicht garantiert werden, selbst wenn $\tilde{u}(x)$ diese Eigenschaften an den Stützstellen x_i besitzt. Es gilt also, diese Eigenschaften *a posteriori* mit Hilfe von mengenbasierten Methoden zu prüfen und das Regelgesetz $\tilde{u}(x)$ wo nötig anzupassen [4, 5]. Wesentliche Teilschritte des vorgestellten Ansatzes sind die Berechnung eines positiv invarianten Zielgebietes mit linearem Zustandsregler, die Erweiterung des Einzugsgebietes mit Methoden der Erreichbarkeitsanalyse unter Verwendung eines stückweise konstanten Reglers sowie die Approximation, Verifikation und räumliche Vereinfachung der Zustandsraumzerlegung des Stellgesetzes. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel eines resultierenden, näherungsweise optimalen expliziten Reglers.

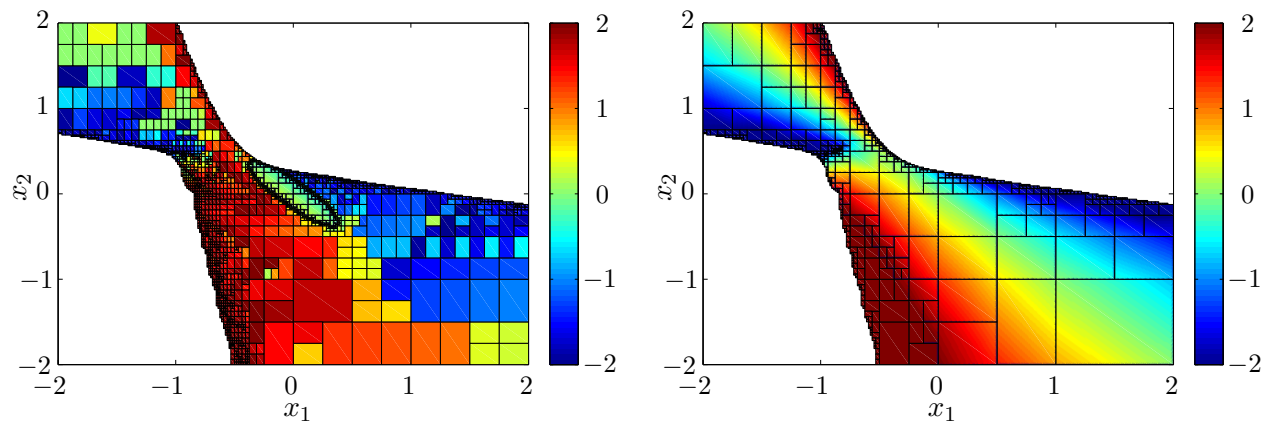


Abb. 1: Stückweise konstantes Regelgesetz $\tilde{u}(x)$, $\tilde{u} : [-2, 2] \times [-2, 2] \rightarrow \mathbb{R}$ auf seinem Einzugsgebiet mit garantierter Stabilität (links). Daraus abgeleitetes, näherungsweise optimales Regelgesetz (rechts). Farben geben den Wert von \tilde{u} an. Das Beispielsystem ist [2] entnommen.

Literatur

- [1] A. Bemporad, M. Morari, V. Dua, and E. N. Pistikopoulos. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems. *Automatica*, 38(1):3–20, 2002.
- [2] H. Chen and F. Allgöwer. A quasi-infinite horizon nonlinear model predictive control scheme with guaranteed stability. *Automatica*, 34:1205–1217, 1998.
- [3] T. A. Johansen. Approximate explicit receding horizon control of constrained nonlinear systems. *Automatica*, 40:293–300, 2004.
- [4] S. Summers, D. M. Raimondo, C.N. Jones, J. Lygeros, and M. Morari. Fast explicit nonlinear model predictive control via multiresolution function approximation with guaranteed stability. In *Proc. of 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, Bologna, Italy, 2010.
- [5] M. Schulze Darup and M. Mönnigmann. Explicit feasible initialization for nonlinear MPC with guaranteed stability. In *Proc. of 50th Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida, 2011.

Modellierung kooperativen Straßenverkehrs mit Petrinetzen

Matthias Hübner und Eckehard Schnieder
Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik
Technische Universität Braunschweig
Email: {matthias.huebner, e.schnieder}@tu-bs.de

Kurzfassung

Dieser Beitrag behandelt die Konzeption eines zukünftigen Straßenverkehrs auf Basis von fahrzeuglokalen Entscheidungsmechanismen und Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Derzeitiger Straßenverkehr zeichnet sich durch unterschiedliches und deviantes Fahrzeug- bzw. Fahrerverhalten aus, dessen Konsequenz Phänomene wie Staus und das Auftreten von Unfällen sind [1], [5]. Die Homogenisierung des Fahrzeugverhaltens soll lt. [1] eine Abhilfe dagegen darstellen und durch autonom fahrende Fahrzeuge, die untereinander kommunizieren können, realisiert werden [2]. Das Ziel ist der Entwurf einer fahrzeuglokalen homogenen Regelbasis, die ein spezifiziertes Verkehrsverhalten realisiert.

Zu diesem Zweck wird der Straßenverkehr als ein Objektsystem, nach [6], auf Basis von Petrinetzen mit zwei Ebenen modelliert: die Straßennetzebene, das globale Verhalten einer Fahrzeuggruppe abbildend und die Formationsnetzebene, die Interaktionen zwischen Fahrzeugen abbildend. Durch Kombination von Straßen- und Formationsnetzen werden verschiedene Verkehrssituationen generiert. Mit den jeweils assoziierten Formationsnetzen wird eine Erreichbarkeitsanalyse durchgeführt. In jedem Erreichbarkeitsgraphen werden anschließend Zielzustände identifiziert und ein Pfad zu diesen ermittelt, der ein definiertes Gütemaß minimiert und konsekutiven Interaktionen der Fahrzeuge entspricht.

Mittels der Analyse fahrzeuglokaler Umgebungsparameter werden die jeweiligen Aktionen der Fahrzeuge zu einer fahrzeuglokalen Regelbasis kombiniert[4]. Zwecks Koordination zwischen den Fahrzeugen wird auf dieser Basis ein Kommunikationsprotokoll definiert, das um Konsensalgorithmen ergänzt wird, welche die Stabilisierung der Formationen sicherstellen. Resultat ist eine Regelbasis und ein Kommunikationsprotokoll, das ein Verkehrsverhalten erzeugt, welches die Straßenkapazität bestmöglich ausnutzt und Unfälle inhärent vermeidet [3]. Ein Rahmenwerk ermöglicht neben der Unterstützung bei dem Entwurf der Regelbasis auch die fahrphysiknahe Simulation des resultierenden Verkehrsverhaltens einer Fahrzeuggruppe auf begrenzten Fahrbahnabschnitten.

LITERATUR

- [1] HELBING, Dirk: *Verkehrsdynamik - Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer, 1997
- [2] HÜBNER, Matthias ; LÜCK, Tobias ; SCHNIEDER, Eckehard: Cooperative Control of Multi-Vehicle-Formations in Road Traffic by Means of Consensus Algorithm and Petri Nets. In: *12th IFAC Symposium on Transportation Systems*. Los Angeles, 2009
- [3] HÜBNER, Matthias ; SCHNIEDER, Eckehard: Traffic flow optimization by means of vehicle flocking in Petri-net representation via Consensus-algorithm. In: *AVEC 10 - 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Loughborough, 2010
- [4] HÜBNER, Matthias ; SCHNIEDER, Eckehard: Traffic Organization by means of Vehicle-Sided-Rulebases – A cooperative Approach to Improved Traffic Quality and Traffic Safety. In: *IAV 2010 - 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*. Lecce, Italien, 2010
- [5] RAITHEL, Jürgen: Ein kognitiv-verhaltenstheoretisches Modell devianten Verkehrsverhaltens. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 4 (2010), April, S. 204–205
- [6] VALK, Rüdiger: Petri Nets as Token Objects. In: DESEL, Jörg (Hrsg.) ; SILVA, Manuel (Hrsg.): *Application and Theory of Petri Nets 1998* Bd. 1420. Springer Berlin / Heidelberg, 1998, S. 1–24

Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien

Moritz Werling*

Georg Bretthauer **

* AIA - Institut für Angewandte Informatik/Automatisierungstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) /
BMW Group Forschung und Technik
Hanauer Str. 46, 80992 München
Tel.: +49-89-382-46248
Fax: +49 721 608-47972
Moritz.Werling@bmw.de

** AIA - Institut für Angewandte Informatik /
Automatisierungstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT-Campus Süd, Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
Tel.: +49 721 608-47970
Fax: +49 721 608-47972
Georg.Bretthauer@kit.edu

Schlüsselwörter: Autonomes Fahren, Online-Trajektorienplanung, Optimalsteuerung, Positionstracking

Autonome Fahrzeuge stellen aufgrund ihres großen Potenzials, den Straßenverkehr zukünftig effizienter, komfortabler und vor allem sicherer zu gestalten, einen faszinierenden Bereich für Forschung und Entwicklung dar [1]. Neben der Fahrzeugumfeldwahrnehmung stellen besonders die Bewegungsplanung und -stabilisierung *zeitkritischer Fahrmanöver in dynamischen Verkehrsszenarien* (Ausweichen beweglicher Hindernisse, Einfädeln in den fließenden Verkehr etc.) eine große Herausforderung dar. Bestehende *bahnbasierte* Verfahren sind dieser trotz einer Vielzahl von Modifikationen nicht gewachsen [2] und werden im vorliegenden Beitrag durch ein *trajektorienbasiertes* Gesamtkonzept, welches die Zeit explizit in der Planung und Stabilisierung berücksichtigt, erfolgreich ersetzt.

Im vorgestellten Konzept [3] wird die Trajektoriengenerierung eng mit der -stabilisierung zugunsten eines störungsrobusten Gesamtfahrverhaltens verkoppelt. Dabei wird die Aufgabe der Geschwindigkeits-, Abstands- und Anhalteregelung der High-level-Planungsebene übertragen, während einer Low-level-Regelung ausschließlich die Stabilisierung der berechneten zeitveränderlichen Sollposition zukommt, bekannt auch als Trajektorientracking.

Die konkrete Umsetzung der Trajektoriengenerierung erfolgt auf Basis der Optimalsteuerung, wobei durch Einhaltung des Bellman-Prinzips die sog. *zeitliche Konsistenz* der Fahrtrajektorie sichergestellt wird. Unter Beachtung der Fahrphysik (minimaler Kurvenradius, maximale Quer- und Längsbeschleunigungen etc.) und der zeitlichen Prädiktion aller Hindernisse wird eine längs-quer-kombinierte Optimierung der Fahrbewegung in Echtzeit durchgeführt.

Die für das Trajektorientracking eingesetzten Stabilisierungsgesetze wiederum basieren auf Lyapunov-Techniken sowie der exakten E/A-Linearisierung und decken unter Berücksichtigung der längs-quer-gekoppelten nichtlinearen Reifendynamik den gesamten Geschwindigkeitsbereich ab. Der Rotationsinvarianz des geschlossenen Regelkreises wird dabei besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Anhand acht komplexer, zeitkritischer Innenstadt- und Autobahnszenarien wird schließlich unter Simulation der Umfeldwahrnehmung die praktische

Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems auf einem realen Versuchsfahrzeug prototypisch demonstriert. Hierbei stellen im Innenstadtbereich ein Fehlverhalten des linksabbiegenden (s. *Abbildung 1*) und einmündenden Verkehrs, zwischen parkenden Autos die Fahrbahn betretende Fußgänger und zu überholende Fahrradfahrer das autonome Fahrzeug auf die Probe. Im Autobahnszenario wiederum werden dem Versuchsfahrzeug Einfädelvorgänge in den fließenden Autobahnverkehr, das Ausweichen eines ausscherenden Lkw sowie das Abfangen des Fahrzeugs nach einer kräftigen Windböe bei Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h abverlangt.

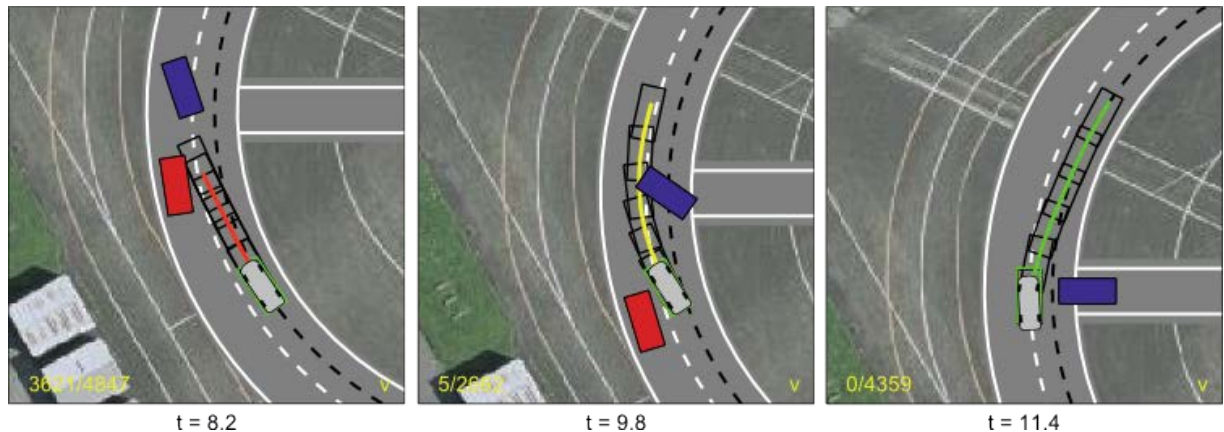


Abbildung 1: Kollisionsvermeidung bei Fahrfehler des links abbiegenden Gegenverkehrs durch kombiniertes Bremsen und Lenken

Literatur:

- [1] Stiller, C. und Gayko, J.: *Kognitive Automobile*. at-Automatisierungstechnik, 11:551--553, 2008.
- [2] Fletcher, L. et al. *The MIT-Cornell collision and why it happened*. Journal of Field Robotics, 25(10):775--807, 2008.
- [3] Werling, M.: Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und – stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien. Dissertation KIT Scientific Publishing, Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik/Automatisierungstechnik, KIT Band 34, 2011.

Energiesparendes Fahren durch Fahrerassistenz im Straßenbahnbetrieb

Christian Gassel

Professur für Verkehrsleitsysteme und -
prozessautomatisierung
Technische Universität Dresden
Andreas-Schubert-Straße 23
Tel.: +49-351-46336749
Fax: +49-351-46336785
E-Mail: christian.gassel@tu-dresden.de

Prof. Jürgen Krimmling

Professur für Verkehrsleitsysteme und -
prozessautomatisierung
Technische Universität Dresden
Andreas-Schubert-Straße 23
Tel.: +49-351-46336750
Fax: +49-351-46336785
E-Mail: juergen.krimmling@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Verkehr, Energieoptimales Fahren, Straßenbahn

Die Unterstützung des Fahrpersonals zum energiesparenden Fahren durch Fahrerassistenzsysteme findet in Vollbahn- und Metrosystemen eine breite Anwendung [1]. Die ermittelte Fahrempfehlung des Assistenzsystems (z.B. Ausrollen ohne Traktionsenergieverbrauch oder Reduktion der Geschwindigkeit) beruht dabei auf einer optimalen Verteilung von im Fahrplan vorgesehenen Fahrzeitreserven auf einem Streckenabschnitt zwischen zwei Betriebshalten. Unter Berücksichtigung der Fahrempfehlungen kann das Fahrpersonal verfrühte Ankünfte an Betriebshalten sowie unnötige Brems- und Beschleunigungsvorgänge reduzieren oder sogar vermeiden.

Die bestehenden Lösungsansätze wurden jedoch aufgrund der besonderen Charakteristika des Verkehrssystems bislang nicht praktisch im Straßenbahnbetrieb eingesetzt.

Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Ursachen:

1. Die reine Fahrzeit zwischen zwei Haltestellen fällt infolge der kurzen Haltestellenabstände gering aus (30-120 Sekunden). Das bedingt eine hohe Sensitivität der Fahrempfehlung gegenüber Veränderungen der Fahrzeitreserve durch Störgrößen. Die Variabilität der tatsächlich zur Verfügung stehenden Fahrzeitreserven ist im Straßenbahnsystem allerdings wesentlich stärker ausgeprägt als bei Vollbahn- oder Metrosystemen. Grund dafür sind die vielfältigen Einflussgrößen (z.B. Lichtsignalanlagen ohne absolute Priorisierung für Straßenbahnen, Behinderungen durch andere Fahrzeuge, starke Streuung der Haltestellenaufenthaltszeiten).
2. Störgrößen, wie die Beeinflussung der Fahrt durch Lichtsignalanlagen (LSA), konnten in der Vergangenheit nicht in einer Echtzeitoptimierung auf dem Fahrzeug berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Verbesserung der Verkehrssteuerung auf der Nord-Süd-Verbindung in der Landeshauptstadt Dresden“ wird erstmalig ein Fahrerassistenzsystem zum energiesparenden Fahren im Straßenbahnbetrieb eingesetzt. Das Assistenzsystem berücksichtigt die Freigabezeiten von kooperativen LSA und unterstützt das Fahrpersonal unnötige Halte vor LSA zu vermeiden [2].

Wie Abbildung 1 verdeutlicht, erfüllt das Assistenzsystem neben der Ermittlung der energieoptimalen Trajektorie weitere Aufgaben innerhalb des Wirkungsplans der energieoptimalen Regelung.

Die energieoptimale Regelung wird initiiert, wenn das Fahrerassistenzsystem Informationen über einen erwünschten Zielzustand \bar{x}_e erhält. Dieser Zustandsvektor

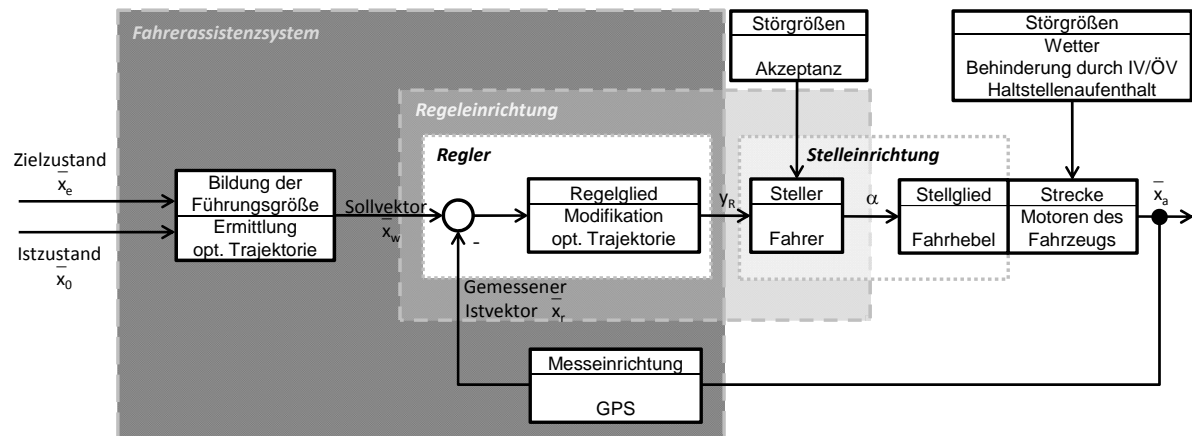


Abbildung 1: Aufgaben des Fahrerassistenzsystems innerhalb des Wirkungsplans der energieoptimalen Regelung

setzt sich aus der Zielankunftszeit, Zielposition und Zielgeschwindigkeit an einer LSA oder Haltestelle zusammen. Unter Kenntnis des Istzustands \bar{x}_0 erfolgt die Ermittlung der optimalen Fahrtrajektorie in lexikographischer Ordnung. In der ersten Optimierungsebene wird der Lösungsraum durch das Gütekriterium Pünktlichkeit eingeschränkt. Es sind lediglich diejenigen Lösungen zulässig, welche eine Zustandsüberführung vom Istzustand \bar{x}_0 zum Zielzustand \bar{x}_e zulassen. In der nachrangigen Optimierungsebene wird die optimale Trajektorie unter Berücksichtigung des minimalen Energieverbrauchs durch Anwendung des Maximumprinzips nach Pontrjagin gefunden [3,4].

Als Führungsgröße geht der Sollvektor \bar{x}_w (Geschwindigkeit und Position für jeden Zeitschritt der ermittelten optimalen Trajektorie) in den Regelkreis ein. Bei Regelabweichungen erfolgt eine Modifikation der optimalen Trajektorie. Die resultierende Fahrempfehlung entspricht der Reglerausgangsgröße y_R und wird durch das Fahrpersonal über einen Stellwinkel α des Fahrhebels realisiert. Das Ausgangssignal des Fahrhebels wird anschließend von den Fahrmotoren des Fahrzeugs in eine Zugkraft umgewandelt. Mithilfe der Ortungskomponenten des Assistenzsystems kann die tatsächliche Regelgröße \bar{x}_a mit ausreichender Genauigkeit gemessen (Istvektor \bar{x}_r) und dem Vergleichsglied zugeführt werden. Beim Auftreten von Störgrößen und entsprechenden Regelabweichungen, kann es dann erneut zur Ausgabe einer Fahrempfehlung kommen.

Die Evaluation zum energetischen Einsparpotential erfolgt zurzeit durch die Dresdner Messstraßenbahn, welche u.a. Leistungskenngrößen aufzeichnet [5].

Literatur:

- [1] Rail Safety and Standards Board Ltd. (2009). Driver advisory information for energy management and regulation. Stage 1 Report
- [2] Gassel, C.; Krimmling, J. (2010). Additional benefit of ITCS data used in road traffic control systems – ways to enhance multimodal transport quality and energy efficiency. World Congress for Transportation Research, Lissabon
- [3] Howlett, P.; Pudney, P. (1995). Energy-efficient train control. Springer, Berlin
- [4] Liu, R.; Golovitcher, I.M. (2003). Energy-efficient operation of rail vehicles. Transportation Research Part A 37, S.917-932
- [5] Harter, M.; Beitelschmidt, M.; Striegler, G.; Sauermann I. (2009). Die Dresdner Messstraßenbahn – Konzept, Architektur, Komponenten; ETR-Eisenbahntechnische Rundschau – Dezember