

17. - 19. Februar 2010

Programm

Kurzfassungen zum Download unter:

www.iosb.fraunhofer.de/Boppard

Aktualisierung vom 27. Januar 2010

Mittwoch, 17. Februar 2010

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

Donnerstag, 18. Februar 2010

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

Haupttagungsraum im EG		S.	Tagungsraum im 3. OG		S.
08:30 – 10:00	Flachheitsbasierte Methoden und Steuerungsentwurf Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. D. Abel		Bildverarbeitung Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. F. Puente León		
08:30 – 09:00	Auswertung notwendiger und hinreichender Bedingungen für differentielle Flachheit mittels Computer-Algebra <i>Felix Anritter (Automatisierungs- und Regelungstechnik, Univ. d. BW München, Prof. Hillermeier, Gr. 22)</i>	1	Merkmalsbasierte probabilistische Datenassoziation für visuelle Objektverfolgung <i>Michael Grinberg (Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, Prof. Beyerer, Gr. 18)</i>		7
09:00 – 09:30	Pfadverfolgung nichtlinearer Systeme unter Beschränkungen <i>Timm Faulwasser (Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Univ. Magdeburg, Prof. Findeisen, Gr. 20)</i>	3	Ein neuartiges Verfahren zur videobasierten Erfassung der Parkraumbelegung <i>Klaus-Peter Döge (Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und Prozessautomatisierung, TU Dresden, Prof. Krimmling, Gr. 10)</i>		8
09:30 – 10:00	Modellprädiktive Temperaturregelung für einen Brammenstoßofen <i>Andreas Steinböck (Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, TU Wien, Prof. Kugi, Gr. 29)</i>	5	Ein Onboard-SLAM-Algorithmus zur Indoor-Navigation eines Quadrotors <i>Mirco Alpen (Regelungstechnik, Univ. d. BW Hamburg, Prof. Horn, Gr. 13)</i>		10

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

17. - 19. Februar 2010

10:30 – 12:00 Modellbildung 1 Sitzungsleitung: Prof. Dr. K. Janschek		Automatisierungstechnik Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. G. Frey	
10:30 – 11:00	Der Mensch im Regelkreis - Steuerungs- und Regelungstechnische Aspekte bei der Ansteuerung eines Fahrsimulators mit Bewegungssystem <i>Martin Fischer (Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR Braunschweig, Prof. Lemmer, Gr. 4)</i>	12	Adaption and Formalization of UML for Open-Loop Control <i>Daniel Witsch (Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, TU München, Prof. Vogel-Heuser, Gr. 21)</i>
11:00 – 11:30	Strukturvariable multikriterielle evolutionäre Optimierung und Identifikation von Regelungssystemen <i>Jan Braun (Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, TU Dortmund, Prof. Bertram, Gr. 8)</i>	14	Systematischer modellbasierter Entwurf verteilter Steuerungen nach IEC 61499 <i>Martin Hirsch (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, Univ. Halle Wittenberg, Prof. Hanisch, Gr. 3)</i>
11:30 – 12:00	Parametrische Modellreduktion in hierarchisch modellierten selbst-optimierenden Systemen <i>Martin Krüger (Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, Uni Paderborn, Prof. Trächtler, Gr. 23)</i>	16	Generische Erzeugung von PFD-Rechenmodellen für PLT-Schutzeinrichtungen <i>Thomas Gabriel (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, TU Kaiserslautern, Prof. Litz, Gr. 16)</i>

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

14:00 – 16:00 Ereignisbasierte und hybride Systeme Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. S. Engell		Anwendungen 1: Fahrzeuge und Verkehr Sitzungsleitung: Prof. Dr. techn. M. Horn	
14:00 – 14:30			Konzeption und Realisierung eines aktiven Fahrwerks mit Preview <i>Andreas Schindler (Institut für Angewandte Informatik/ Automatisierungstechnik, Karlsruher Institut f. Technologie, Prof. Bretthauer, Gr. 17)</i>
14:30 – 15:00	Störkompensation durch ereignisbasierte Regelung <i>Daniel Lehmann (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Lunze, Gr. 3)</i>	24	Robuste Verkehrszustandsschätzung und Störungserkennung im Verkehrsfluss auf Schnellstraßen <i>Martin Schober (Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Prof. Tarin / Prof. Wehlan, Gr. 28)</i>
15:00 – 15:30	Dynamische Programmierung für hybride dynamische Systeme <i>Matthias Rungger (Regelungs- und Systemtheorie, Univ. Kassel, Prof. Stursberg, Gr. 19)</i>	26	Sensormanagement für die Füllungserfassung von modernen Verbrennungsmotoren <i>Andreas de Moll (Automatisierungstechnik und Komplexe Systeme, Univ. Duisburg-Essen, Prof. Ding, Gr. 11)</i>
15:30 – 16:00	Optimierte Instandhaltung von Eisenbahninfrastrukturen <i>Lisandro Quiroga (Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig, Prof. Schnieder, Gr. 4)</i>	28	Online-Schätzung der Kupplungskennlinien eines Doppelkupplungsgetriebes <i>Alex Tarasow (Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, TU Clausthal, Prof. Bohn, Gr. 14)</i>

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

16:30 – 17:30 Plenarvortrag im Haupttagungsraum EG Das Large Hadron Collider Projekt : Vorstoß zum Beginn des Universums <i>Prof. Dr. Siegfried Bethke, geschäftsführender Direktor Max-Planck-Institut für Physik, München</i>
--

18:30 Abendessen im Rheinhotel Bellevue

Freitag, 19. Februar 2010

08:30 – 10:00 Nichtlineare Regelungen Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. J. Rudolph		Modellbildung 2 Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Christoph Ament	
08:30 – 09:00	Nichtlineare H_∞ -Regelung für nichtlineare zeitvariante Systeme – iISS-Stabilitätsanalyse <i>Bernd Schmidt (Fachgebiet Regelungstechnik, TU Ilmenau, Prof. Reger, Gr. 15)</i>	35	Modellierung und Regelung von HF-Systemen in Schwerionensynchrotrons <i>Dieter Lens (Regelungstheorie und Robotik, TU Darmstadt, Prof. Adamy, Gr. 7)</i>
09:00 – 09:30	Transparente Parametrierung der nichtlinearen Zustandsregelung mit IDA-PBC <i>Paul Kotyczka (Lehrstuhl für Regelungstechnik, TU München, Prof. Lohmann, Gr. 22)</i>	37	Ansätze zur Regelung in der adaptiven Optik <i>Thomas Ruppel (Institut für Systemdynamik, Univ. Stuttgart, Prof. Sawodny, Gr. 27)</i>
09:30 – 10:00	Sliding-Mode Regelung eines unteraktuierten Manipulators <i>Carsten Knoll (Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, TU Dresden, Prof. Röbenack, Gr. 9)</i>	39	Modelling and Simulation of a Mobile Robot-Assisted Gait Rehabilitation System <i>Siniša Slavnić (Institut für Automatisierungstechnik, Univ. Bremen, Prof. Gräser, Gr. 5)</i>

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

10:30 – 11:30 Anwendungen 2: Modellierung und Regelung in der Robotik Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. J. Adamy		Anwendungen 3: Medizintechnik und Systembiologie Sitzungsleitung: Prof. Dr. Ing. O. Sawodny	
10:30 – 11:00	Modellierung und Steuerung eines strukturelastischen Roboters <i>Matthias J. Reiner (Institut für Robotik und Mechatronik, DLR, Wessling, Prof. Bals, Gr. 12)</i>	47	Robustheit in der Systembiologie: mehrstationäre Lösungen <i>Carsten Conradi (Fachgebiet Regelungssysteme, TU Berlin, Prof. Raisch, Gr. 2)</i>
11:00 – 11:30	Kollisionsvermeidung bei stationären Robotern mit Hilfe künstlicher Kraftfelder <i>Alexander Winkler (Robotersysteme, TU Chemnitz, Prof. Suchý, Gr. 6)</i>	49	Modellbildung und Regelung des extrakorporalen Gasaustausches <i>Tobias Wartzek (Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik, RWTH Aachen, Prof. Leonhardt, Gr. 1)</i>

11:30 – 11:45 Aufruf zur Konferenz Automation im Haupttagungsraum EG
Prof. Jumar, Dr. Bettenhausen

11:45 – 12:15 Abschluss

Preisverleihung durch einen Vertreter der Beckhoff Automation GmbH

Aufruf für Boppard 2011

12:30 - 13:30 Mittagessen im Rheinhotel Bellevue

13:30 Ende des Kolloquiums

Auswertung notwendiger und hinreichender Bedingungen für differentielle Flachheit mittels Computer-Algebra

Felix Anritter

Automatisierungs- und Regelungstechnik (EIT 8.1)
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg
Tel.: 089-6004-3986
Fax: 089-6004-4713
felix.anritter@unibw.de

Schlüsselwörter: Nichtlineare Regelsysteme, differentielle Flachheit, Computer-Algebra-Systeme

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der automatisierten Bestimmung sogenannter *flacher Ausgänge* von Regelsystemen [1,2,3]. Flache Ausgänge sind spezielle verallgemeinerte Ausgänge, die – vereinfacht gesprochen – die Eigenschaft besitzen, dass alle Trajektorien des Systems als glatte Funktionen der Komponenten des flachen Ausgangs und einer endlichen Zahl ihrer Ableitungen beschrieben werden können.

Kürzlich [4] wurde eine Charakterisierung flacher Ausgängen im Kontext unendlich-dimensionaler Jet-Mannigfaltigkeiten (siehe z.B. [2,3]) vorgestellt, die einen abstrakten Algorithmus zur Bestimmung flacher Ausgänge liefert. Für den vorgestellten Ansatz werden implizite Systeme betrachtet, die man durch Elimination der Eingänge des expliziten Systems erhält. Dieses Vorgehen führt zu angepaßten Versionen von Lie-Bäcklund Äquivalenz und Lie-Bäcklund Isomorphismen.

Die aus diesem Formalismus resultierenden notwendigen und hinreichenden Kriterien für differentielle Flachheit führen dabei auf eine Zerlegung des Kotangentenraumes anhand des sogenannten Variationssystems. Die zur Analyse der sich ergebenden Untermodule verwendeten Methoden verbinden Konzepte der Differentialalgebra und der Differentialgeometrie.

Es wird erläutert, welche Anforderungen an eine Umsetzung mittels Computer-Algebra resultieren und wie die eingeführten Methoden effizient mittels des Computer-Algebra-Systems Maple implementiert werden können. Die erarbeitete Struktur erlaubt dabei deutlich allgemeinere Berechnungen, als dies in ersten Vorstudien [5,6] der Fall war.

Literatur:

- [1] Fliess, M. , Lévine J., Martin Ph, Rouchon P.: Flatness and Defect of Nonlinear Systems: Introductory Theory and Examples, Int. J. Control, 61(6), S. 1327–1361, 1995
- [2] Martin, Ph., Murray R.M., Rouchon P.: Flat Systems, In: Plenary Lectures and Minicourses, Proc. ECC 97, Brüssel, S. 211–264, Bastin, G., Gevers M. (Hrsg.), 1997

- [3] Fliess, M.; Lévine, J.; Martin, Ph.; Rouchon, P.: A Lie-Bäcklund Approach to Equivalence and Flatness of Nonlinear Systems, IEEE Trans. Automat. Control, 44(5), S. 922–937, 1999
- [4] Lévine, J.: Analysis and Control of Nonlinear Systems: A Flatness-based Approach, Springer, 2009
- [5] Antritter, F.; Lévine, J.: Towards a Computer Algebraic Algorithm for Flat Output Determination, ISSAC 2008, Hagenberg 2008
- [6] Antritter, F.; Lévine, J. : Sur la Détermination des Sorties Plates par Calcul Formel, CIFA 2008, Bukarest 2008

Pfadverfolgung nichtlinearer Systeme unter Beschränkungen

Timm Faulwasser

Lehrstuhl für Systemtheorie und
Regelungstechnik,
Institut für Automatisierungstechnik
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
0391 / 67 18 577
0391 / 67 11 191
Timm.Faulwasser@ovgu.de

Rolf Findeisen

Lehrstuhl für Systemtheorie und
Regelungstechnik,
Institut für Automatisierungstechnik
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
0391 / 67 18 577
0391 / 67 11 191
Rolf.Findeisen@ovgu.de

Schlüsselwörter: Pfadverfolgung, nichtlineare Systeme, Beschränkungen, Trajektorienfolge, prädiktive Regelung.

In dieser Arbeit stellen wir einen neuen Ansatz zur Pfadverfolgung für nichtlineare Systeme unter Beschränkungen der Stell- und Zustandsgrößen vor. Das Ziel einer Pfadverfolgung ist es, dass ein System einer ein- oder mehrdimensionalen Referenzmannigfaltigkeit im Zustandsraum (dem Pfad) möglichst gut folgt und dabei Beschränkungen eingehalten werden. In der Praxis sind Pfadverfolgungsprobleme u. A. bei der Regelung von CNC-Maschinen, bei der automatischen Bahnfolge von Schiffen, Flugzeugen und Automobilen (z.B. Einparkprobleme) oder der Regelung von Prozessen zur Batchkristallisation von großer Bedeutung, vgl. [1, 2].

Existierende Lösungen für solche Anwendungen führen Pfadverfolgungsprobleme meist auf Trajektorienfolgeprobleme zurück, indem im ersten Schritt eine, in der Referenzmannigfaltigkeit enthaltene, Trajektorie berechnet wird. Im zweiten Schritt wird diese Referenztrajektorie mit Hilfe einer Folgeregelung stabilisiert. Ein solches Vorgehen schränkt u. U. jedoch die erreichbare Regelgüte und den Einzugsbereich des Reglers unnötig ein. Eine direkte Lösung des Pfadverfolgungsproblems kann diese Einschränkungen vermeiden und bietet zusätzlich den Vorteil, dass das Voranschreiten des Systems entlang des Pfades adaptiv an auftretende Störungen angepasst werden kann, vgl. [3, 4].

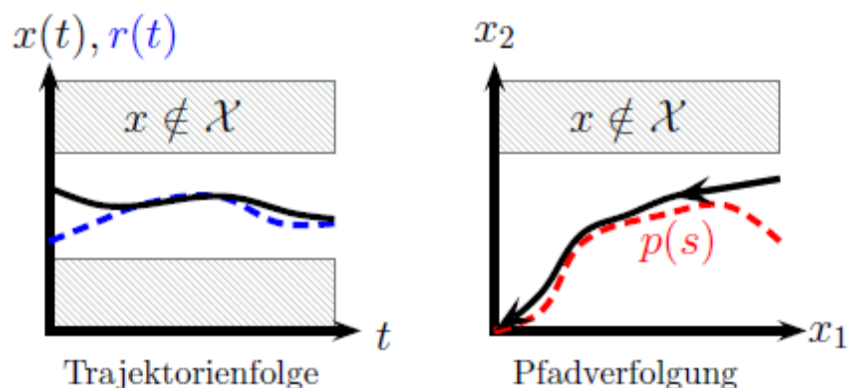


Abbildung 1: Trajektorienfolge (blau gestrichelt die zeitabhängige Referenz) und Pfadverfolgung (rot der geometrische Referenzpfad).

Zur direkten Lösung von Pfadverfolgungsproblemen existieren eine Reihe von Ansätzen für lineare und nichtlineare Systeme, vgl. [1-4]. In existierenden Arbeiten werden meist keine Beschränkungen berücksichtigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, der die explizite Berücksichtigung von Beschränkungen der Stell- und Zustandsgrößen ermöglicht, siehe [5, 6]. Im Wesentlichen basiert der hier verfolgte, optimierungsbasierte Zugang auf einer geeigneten, stabilisierenden Formulierung eines prädiktiven Regelungsverfahrens. Dabei wird das Pfadverfolgungsproblem auf die online Berechnung und Stabilisierung einer, auf die eindimensionale Referenzmannigfaltigkeit beschränkten, Solltrajektorie zurückgeführt. Die grundlegende Vorgehensweise ist vergleichsweise einfach. Der Referenzpfad P_1 wird als Bild eines parametrisierten Weges $p(s)$ beschrieben:

$$P_1 = \{s \in \mathbb{R} \mapsto p(s) \in \mathbb{R}^n\}$$

Der Pfadparameter s wird als zusätzlicher Zustand betrachtet, dessen Evolution durch eine zusätzliche Stellgröße beeinflusst wird. D.h. im Regler wird mit Hilfe dynamischer Optimierungsverfahren ein geeigneter zeitlicher Verlauf des Pfadparameters bestimmt. Dadurch können sowohl Beschränkungen der Stell- und Zustandsgrößen berücksichtigt als auch Stabilität garantiert werden.

Literatur:

- [1] Skjetne, R., Fossen T.I. und Kokotovic, P. V. (2004). Robust output maneuvering for a class of nonlinear systems. *Automatica*, 40(3):373–383.
- [2] Do, K. D. und Pan, J. (2006). Global robust adaptive path following of underactuated ships. *Automatica*, 42(10):1713–1722.
- [3] Aguiar, A. P., Hespanha, J. P. und Kokotovic, P. V. (2005). Path-following for nonminimum phase systems removes performance limitations. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 50(2):234 –239.
- [4] Aguiar, A. P., Hespanha, J. P. und Kokotovic, P. V. (2008). Performance limitations in reference tracking and path following for nonlinear systems. *Automatica*, 44(3):598–610.
- [5] Faulwasser, T. und Findeisen, R. (2009). Ein prädiktiver Ansatz zur Lösung nichtlinearer Pfadverfolgungsprobleme unter Beschränkungen. at - Automatisierungstechnik Vol. 8, 386–394.
- [6] Faulwasser, T., Kern, B. und Findeisen, R. (2009). Model predictive path-following for constrained nonlinear systems. 48th IEEE Conf. on Decision and Control, Shanghai, China. Accepted.

Modellprädiktive Temperaturregelung für einen Brammenstoßofen

Andreas STEINBÖCK und Andreas KUGI

Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, ACIN
Technische Universität Wien
Gusshausstraße 27-29/376, 1040 Wien, Österreich
Telefon: +43 1 58801 - 37615
Fax: +43 1 58801 - 37699
E-Mail: {steinboeck,kugi}@acin.tuwien.ac.at

Schlüsselwörter: schaltendes nichtlineares System, beschränkte dynamische Optimierung, Trajektorienplanung, Modellprädiktive Regelung, Energieeffizienz

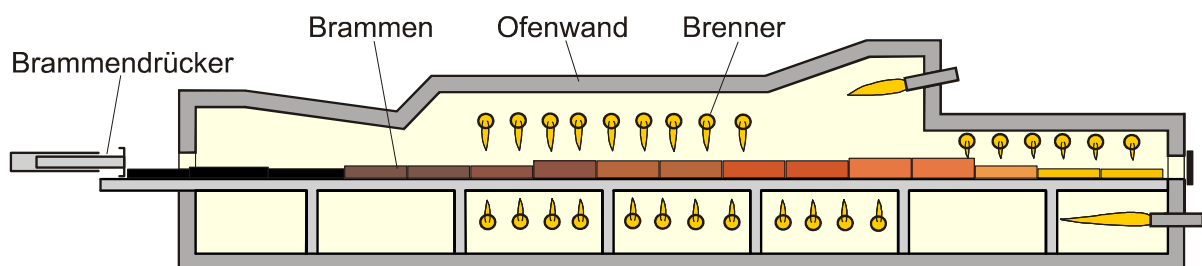


Abbildung 1: Brammenstoßofen

In der Stahlindustrie müssen Brammen auf die zur Bearbeitung im Walzwerk notwendige Temperatur erhitzt werden. Dazu kann ein gas- oder ölbefuehrter Stoßofen, wie er in Abbildung 1 skizziert ist, verwendet werden. Die aneinandergereihten Brammen liegen auf schmalen, dampfgekühlten Gleitschienen, um einen gleichmäßigen Wärmeeintrag durch thermische Strahlung von allen Seiten zu ermöglichen. Ein Brammendrucker schiebt die Brammenreihe durch das Ofeninnere, wobei die Weiterschiebezeitpunkte meist von anderen Prozessschritten, z.B. dem nachfolgenden Walzvorgang, vorgegeben werden.

Die Ofentemperaturregelung soll die Brennstoffzufuhr der Brenner so einstellen, dass die Brammen bei vorgegebenem Weg-Zeit-Diagramm auf eine bestimmte Zieltemperatur erwärmt werden. Dabei unterliegen sowohl die Brammentemperaturen als auch die Ofentemperaturen engen, möglicherweise zeitabhängigen Schranken. Meist weisen die Brammen unterschiedliches Material, unterschiedliche Geometrie, Anfangstemperaturen, Zieltemperaturen, Temperaturschranken, Aufheizdauern, etc. auf, was die vorliegende Mehrgrößen-Regelungsaufgabe erschwert. Während die Temperatur der Ofenwände mittels Thermoelementen messbar ist, kann das Temperaturfeld in den Brammen nicht messtechnisch bestimmt werden.

Berücksichtigt man im Zuge der Modellbildung Verbrennungsvorgänge, Energiebilanzen, Gasmassenströme, Strahlungsbilanzen, sowie Wärmeleitung in den Brammen und den Ofenwänden, so erhält man ein schaltendes, nichtlineares dynamisches Modell, das zur Simulation und zum Beobachterentwurf geeignet ist [8]. Für den untersuchten Ofen wurde damit ein erweitertes Kalman Filter entworfen. Ein reduziertes, mathematisch einfacheres Modell ergibt sich, wenn die Wärmeleitungsgleichung in den Brammen mittels Galerkin-Methode gelöst und Ofenzonen-temperaturen als Modelleingänge verwendet werden [7]. Man geht hierbei von einer

kaskadierten Regelung aus, deren innere Regelkreise die lokalen Ofenzonen-temperaturen einstellen. Anhand des reduzierten Modells, das weiterhin eine schaltende, nichtlineare Struktur, jedoch nur noch etwa 80 Zustände und acht Eingangsgrößen besitzt, wird eine Mehrgrößenregelung für den äußeren Regelkreis entworfen. Ziel dabei ist es, die Brammen möglichst genau gemäß ihren individuellen Vorgaben aufzuheizen, alle Schranken der Ofenzonentemperaturen einzuhalten und den Energieverbrauch zu minimieren. Ferner soll die Regelung speicher- und rechenzeiteffizient sein, um eine echtzeitfähige Implementierung zu ermöglichen.

Zum Entwurf eines modellprädiktiven Reglers wird daher eine an diese Anforderungen angepasste, beschränkte, dynamische Optimierungsaufgabe auf einem bewegten Zeithorizont formuliert [1], [2], [3], [5]. Die Optimierung liefert Solltrajektorien der Ofenzonentemperaturen, welche als Führungsgrößen der inneren Regelkreise verwendet werden. Eine Eingangsgrößen transformation [4], die konsistente Approximation der Stellgrößen [6] und der näherungsweise Ersatz einiger Beschränkungen durch innere oder äußere Barrierefunktionen in der Kostenfunktion erlauben, die Aufgabe in ein parametrisches, unbeschränktes, nichtlineares Optimierungsproblem umzuschreiben, welches mit Hilfe des Quasi-Newton-Verfahrens einfach gelöst werden kann.

Der Planungs- und Regelungsalgorithmus wurde in einer Simulationsumgebung, in der das genaue mathematische Modell den realen Ofen ersetzt, getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem vorgeschlagenen Optimierungsverfahren eine hohe Genauigkeit des Brammenaufheizvorganges bei gleichzeitiger Minimierung des Primärenergieverbrauches erreicht werden kann. Die Methode soll in weiterer Folge am realen System zum Einsatz kommen.

Literatur:

- [1] F. Allgöwer, T. Badgwell, J. Qin, J. Rawlings und S. Wright, „Nonlinear predictive control and moving horizon estimation - An introductory overview,“ *Advances in Control, Highlights of ECC '99*, S. 391–449, 1999.
- [2] M. Diehl, H. Ferreau und N. Haverbeke, „Efficient numerical methods for nonlinear MPC and moving horizon estimation,“ *Nonlinear Model Predictive Control – Towards New Challenging Applications*, S 391–417, 2009.
- [3] K. Graichen und A. Kugi, „Stability of incremental model predictive control without terminal constraints,“ Eingereicht bei *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2009.
- [4] K. Graichen und N. Petit. „Constructive methods for initialization and handling mixed state-input constraints in optimal control,“ *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 31, Nr. 5, S 1334–1343, 2008.
- [5] D. Mayne, J. Rawlings, C. Rao und P. Scokaert, „Constrained model predictive control: stability and optimality,“ *Automatica*, Vol. 36, Nr. 6, S. 789–814, 2000.
- [6] E. Polak, *Optimization: Algorithms and consistent approximations*, Serie: Applied Mathematical Sciences. New York: Springer, 1997, Nr. 124.
- [7] A. Steinboeck, D. Wild, T. Kiefer und A. Kugi, „A mathematical model of a slab reheating furnace with radiative heat transfer and nonparticipating gaseous media,“ Eingereicht bei *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009.
- [8] D. Wild, T. Meurer und A. Kugi, „Modelling and experimental model validation for a pusher-type reheating furnace,“ *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, Vol. 15, Nr. 3, S. 209–232, 2009.

Merkmalsbasierte probabilistische Datenassoziation für visuelle Objektverfolgung

Michael Grinberg

Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB

Die meisten Objektverfolgungsansätze basieren auf einer Filterung aufeinanderfolgender Messungen, die durch ein vorgeschaltetes Detektionsverfahren aus den Sensordaten gewonnen werden. Für eine robuste Objektverfolgung sind daher eine stabile Objektdetektion sowie eine korrekte Assoziation zwischen Messungen und Tracks erforderlich.

Sensorische und algorithmische Einschränkungen, Verdeckungseffekte und Rauschen führen oft zu fehlerhaften, unvollständigen, zerteilten und verschmolzenen Detektionen sowie zu gänzlich stördatenbasierten oder fehlenden Detektionen. In Kombination mit der Unsicherheit über die Existenz und die Anzahl der Objekte in der Szene sowie deren Sichtbarkeit führt dies zu Mehrdeutigkeiten bei der Assoziation, die oft grobe Fehler bei der Objektverfolgung bewirken.

Das vorgeschlagene merkmalsbasierte Datenassoziations- und Tracking-Verfahren erlaubt eine korrekte Objektverfolgung ungeachtet der Verschmelzungs-, Zerteilungs- und Verdeckungseffekte. Wir verwenden Information über die Zusammensetzung der Messungen, die durch die Verfolgung einzelner Merkmalspunkte im Bild und im 3D-Raum gewonnen werden, um die gesuchten Objekt-Eigenschaften trotz der durch die o.g. Effekte verursachten Detektionsfehlern zu rekonstruieren. Die Datenassoziationsmehrdeutigkeiten werden in einer global optimalen weichen Entscheidung aufgelöst, die zusätzlich zur Prädiktion der Objektdynamik auf einer Existenz- und Beobachtbarkeitsprädiktion basiert. Die entsprechenden Objektzustände bzw. deren Wahrscheinlichkeiten werden in Form von drei Markov-Ketten modelliert, die die üblichen Unsicherheitsfaktoren einer sensorbasierten Objektverfolgung berücksichtigen. Für die Beobachtbarkeitsmodellierung wird eine Gitterrepräsentation der Objekte vorgeschlagen, die eine detaillierte Vedeckungsanalyse erlaubt. Das Gesamtkonzept realisiert dabei sowohl ein Track-Before-Detect- als auch ein Detection-by-Tracking-Schema. Durch die probabilistische Betrachtung aller akquirierten Informationen wird letztendlich eine Objektverwaltung ermöglicht, die Entscheidungen über die Initialisierung, Bestätigung und Terminierung von Tracks aufgrund einer fundierten Wissensbasis fällt.

Ein neuartiges Verfahren zur videobasierten Erfassung der Parkraumbelegung

Dr.-Ing. Klaus-Peter Döge

Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme- und
prozessautomatisierung
Technische Universität Dresden
Andreas Schubert Straße 23
+49.351.4633679
+49.351.4633685
KlausPeter.Doege@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling

Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme- und
prozessautomatisierung
Technische Universität Dresden
Andreas Schubert Straße 23
+49.351.4633684
+49.351.4633685
Juergen.Krimmling@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Ruhender Verkehr, Sobel-Filter, Hough-Transformation

Die hier vorgestellte Arbeit ist ein vom Land Sachsen gefördertes Forschungsprojekt. Das Arbeitsziel besteht in der Entwicklung von Algorithmen zur automatischen Ermittlung der Parkraumbelegung und von Falschparkern aus Live-Kamerabildern auf Autobahnraststätten mit Tagsichtkameras. Bei Dunkelheit werden Infrarotscheinwerfer eingesetzt.

Anwendungen der digitalen Bildverarbeitung im Straßenverkehr unterscheiden sich signifikant gegenüber verwandten Anwendungen in der Medizin oder der industriellen Bildverarbeitung. Die Hauptursache dafür ist, dass die Umgebungsbedingungen vor allem durch die Beleuchtungsverhältnisse und die Bebauung geprägt werden und somit nicht beeinflussbar sind. Erschwerend kommt hinzu, dass die Position der Kamera häufig nach baulichen Gesichtspunkten gewählt wird.

Geht man nun davon aus, dass nur die Bildobjekte (Fahrzeuge) und der unmittelbare Hintergrund (Straße) zur Signalgenerierung dienen, sind diese Signale einer Reihe von Störeinflüssen wie inhomogener Hintergrund, Schatten, Niederschläge und Fahrzeugüberdeckungen ausgesetzt. Bei zunehmender Dunkelheit werden die Umriss der Bildobjekte bedeutungslos und, sofern vorhanden, durch die zufällige Form des Scheinwerferlichtes ersetzt. Diese Tatsachen führen dazu, dass die Merkmale Umriss, Helligkeitsverteilung und Farbverteilung der Bildobjekte und des Hintergrundes als Zufallsgrößen angesehen werden müssen, die sich unabhängig von den zu ermittelnden Verkehrszustandsgrößen ändern. Das lässt folgende Schlussfolgerungen zu: 1. Gleiche Systemzustände werden durch unterschiedliche Signale repräsentiert und 2. Robustheit und Detaillierungsgrad eines Verfahrens zur videobasierten Verkehrsdatenerfassung stehen im Zielkonflikt. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wurde ein neuartiges Verfahren zur Analyse des ruhenden Verkehrs entwickelt, welches die Abbildung des



Abbildung 1: Abweichungen von der Standardsituation

Prozesses in stochastische Helligkeits- und Formvarianten von Bildobjekt und Hintergrund berücksichtigt. Ausgehend von einer Standardsituation wird besonderes Augenmerk auf Sondersituationen und die Einsetzbarkeit bei Dunkelheit gelegt, welche die eigentliche Herausforderung darstellen. Abbildung 1 zeigt deutlich, dass auf jegliche Vorinformationen welche die Größe, Form oder Farbe der Bildobjekte berücksichtigen, verzichtet werden muss.

Gewählt wurde deshalb ein Ansatz, der die Fahrzeugkanten unabhängig von deren Größe und Intensität bewertet. Als einzige Vorinformation wird die Richtung der Kanten verwendet. Die Kantenfilterung eines Bildes $b(m,n)$ der Größe $m \times n$ erfolgt durch Faltung mit einem geeigneten Faltungskern $h(m',n')$ der Größe $m' \times n'$.

$$b'(m,n) = h(m',n') * b(m,n) = \sum_{m'=-r}^r \sum_{n'=-r}^r h(m',n') b(m-m',n-n')$$

Als geeignet hat sich der Sobel-Operator erwiesen ($r = 1$), der eine getrennte Filterung in x- und y-Richtung ermöglicht und außerdem eine Glättung in die entsprechende Richtung vornimmt.

$$h_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad h_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Das Ergebnis ist das kantengefilterte Bild $b'(m,n)$. Ein Maß für die Intensität der Kanten liefert die Hough-Transformierte $b''(R,\varphi)$ des kantengefilterten Bildes:

$$b''(R,\varphi) = \sum_{x=-n/2}^{x=+n/2} \sum_{y=-m/2}^{y=+m/2} b'(x,y) \delta(\mathbf{x}^T \mathbf{e} - R) \Delta x \Delta y$$

Dabei ist

$$\mathbf{x} = (x, y)^T$$

der Ortsvektor eines Bildpunktes $P(m,n)$ im Bild $b(m,n)$ und

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{pmatrix}$$

ein Vektor mit den Richtungskomponenten von R . Der Transformationskern ist so definiert, dass die Funktionswerte $b'(x,y)$ auf einer Bildkante aufsummiert werden:

$$\delta(\bullet) = \begin{cases} 0 & \bullet \neq 0 \\ 1 & \bullet = 0 \end{cases}$$

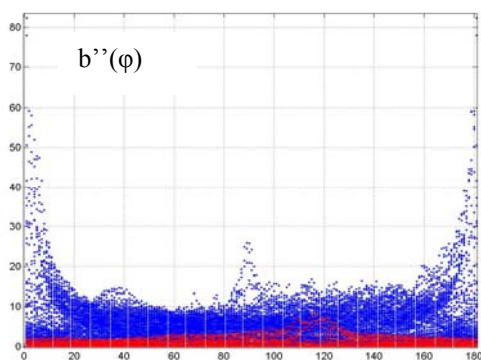


Abbildung 2: Die Hough-Transformierte bei freier (rot) und belegter Parkfläche (blau)

Bei Anwesenheit eines Fahrzeuges liefert die Hough-Transformierte $b''(r,\varphi)$ ein ausgeprägtes Maximum über φ für senkrechte Kanten, das als automatisch zu ermittelndes und auszuwertendes Merkmal für die Anwesenheit von Fahrzeugen geeignet ist (Abb. 2). Eine Berechnung der Varianzen σ_φ über alle Winkel φ und nochmalige Berechnung einer Varianz σ_{gesamt} über σ_φ führt zu einem robusten Unterscheidungsmaß für die Zustände „Parkfläche belegt“ und „Parkfläche frei“.

Literatur:

- [1] Leon, F.P. und Beyerer J. Die Radontransformation in der digitalen Bildverarbeitung at 10/2002: 472-480
- [2] Jähne, B. Digitale Bildverarbeitung. 5. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2002

Ein Onboard-SLAM-Algorithmus zur Indoor-Navigation eines Quadrotors

Mirco Alpen, Joachim Horn
Hemut-Schmidt-Universität
Universität der Bundeswehr Hamburg
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg
Tel. 040 / 6541-2328 / -3593
{mirco.alpen / joachim.horn}@hsu-hh.de

Schlüsselwörter: SLAM, Indoor Navigation, Quadrotor

Um autonom in einer unbekanntem Umgebung agieren zu können, muss ein Roboter in der Lage sein, die Umgebung zu erfassen und sich in dieser zu lokalisieren. Dieses unter dem Begriff SLAM (engl. **S**imultaneous **L**ocalization **A**nd **M**apping) bekannte Problem wurde in den vergangenen Jahren mit diversen Ansätzen bearbeitet [3]. Für die meisten dieser Ansätze ist eine hohe Rechenleistung erforderlich. Eine echtzeitfähige Umsetzung erfordert daher leistungsfähige Computer.

Unsere Untersuchungen basieren auf einer Methode, bei der nur Linien, die in einem rechten Winkel zueinander stehen, aus Messdaten eines Laserscanners herausgefiltert und gespeichert werden. Aus dieser Annahme resultiert ein SLAM-Algorithmus mit einer vergleichsweise geringen Komplexität. Eine Echtzeitanwendung auf kleineren und leichteren aber weniger leistungsfähigen Rechnern wird somit möglich. Der 2007 von Choi, Lee und Oh präsentierte Algorithmus [1] bildet den Ausgangspunkt für die hier dargestellten Betrachtungen, deren Ziel ein echtzeitfähiger SLAM-Algorithmus auf einem an Bord befindlichen Microcontroller ist.

Der SLAM-Algorithmus lässt sich in fünf Schritte unterteilen. Zunächst werden die Daten des Laserscanners aufbereitet und Messfehler eliminiert. Im zweiten Schritt werden auf Basis des Iterativen-Endpunkt-Verfahrens (engl. **I**terative **E**nd **P**oint **F**it) Linien aus den Messpunkten extrahiert. Im anschließenden dritten Schritt werden diese Linien auf senkrechte und waagerechte Verläufe überprüft. Lediglich leichte Abweichungen zu dem 90°-Raster werden toleriert.

Auf dem vierten Schritt, der Eingliederung eines aktuellen Scans in die bereits aufgebaute Karte, liegt das Hauptaugenmerk dieses Beitrags. Dieser Schritt stellt den rechenintensivsten Teil des Algorithmus dar, da sich hier üblicherweise iterativer Methoden [2] bedient wird, mit denen sich sowohl Rotations- als auch Translationsbewegungen zwischen zwei Scans ermitteln lassen. Alternativ lässt sich die Rotationsbewegung durch Auswertung eines Magnetsensors feststellen. Um dann einen Scan in eine aufgebaute Karte zu integrieren, muss aus den optischen Messdaten lediglich die Verschiebung ermittelt werden. Dies ist mit nur einem Iterationsschritt möglich.

Abb. 1 zeigt beispielhaft die schematische Darstellung des Verfahrens zur Ermittlung der Bewegung in x-Richtung. In diesem Beispiel wurden $\Lambda_L = 6$ vertikale Linien aus dem aktuellen Scan extrahiert. Zunächst werden in a) alle Abstände dieser „neuen Linien“ zu potentiell passenden „alten Linien“ ermittelt und wie in b) gezeigt nach Betrag und Vorzeichen sortiert. Danach wird jeweils ein Intervall der Länge $\Lambda_W = \Lambda_L - 1$ dieser Abstände beginnend mit dem größten betrachtet. Die Differenz aus kleinstem und größtem Wert eines Intervalls wird mit Δ_t bezeichnet. Aus dem kleinsten Δ_t wird die Verschiebung in der betrachteten Richtung bestimmt (siehe grauer Kasten in b)).

Im fünften Schritt des SLAM-Algorithmus werden dann im geringen Abstand parallel verlaufende Linien der erstellten Karte, wie beispielsweise in der linken Hälfte in c) zu

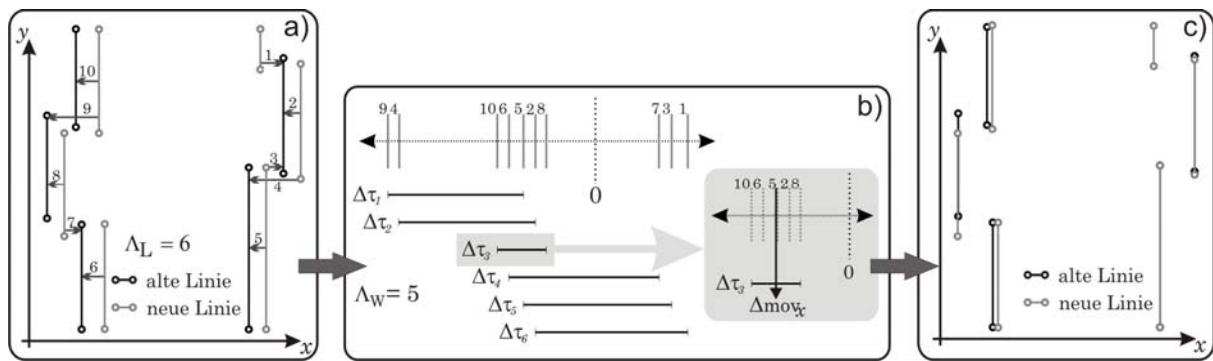


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Eingliederung eines Scans

sehen, zusammengefasst, um den benötigten Speicherplatz der Karte zu reduzieren.

Der beschriebene Algorithmus wurde sowohl offline als auch online in einem Flur unseres Laborbereichs validiert. Bei der Offline-Validierung wurden zunächst Laserscannerdaten eines mit 0,5 m/s in y -Richtung fahrenden Roboters aufgenommen und mit dem in Matlab realisierten Algorithmus ausgewertet.

Bei der Online-Validierung wurde der Algorithmus auf einem Microcontroller, der sich an Bord des Quadrotors befindet, implementiert und die Daten in Echtzeit ausgewertet. Abb. 2 zeigt die Karte, die aus dem beschriebenen SLAM-Algorithmus resultiert.

Die in schwarz dargestellte Karte des Roboters gibt die Struktur des in Grau eingezeichneten Grundrisses gut wieder. Auffällig ist, dass die Maße beider Karten nicht übereinstimmen. Dieser Fehler ist auf die erwähnte Zusammenfassung parallel verlaufender Linien zurückzuführen. Führt man diese jedoch nicht durch, nimmt durch die stark steigende Anzahl der Linien die Berechnungszeit stark zu. Daher wird dieser Fehler zunächst in Kauf genommen.

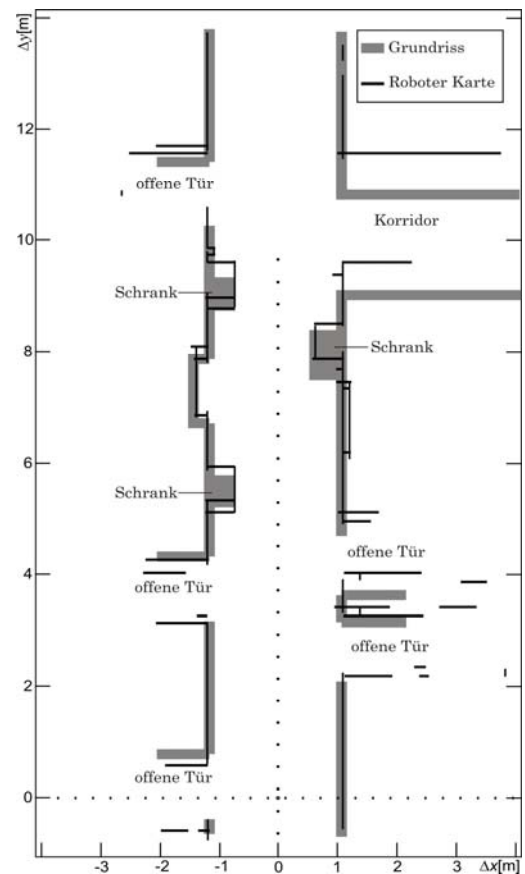


Abbildung 2: Karte und Grundriss

Literatur

- [1] Y.-H. Choi, T.-K. Lee and S.-Y. Oh, *A line feature based SLAM with low grade range sensors using geometric constrains and active exploration for mobile robot*. Netherlands: Springer, Autonomous Robots, Volume 24, Number 1 / Januar 2008.
- [2] A. Diosi and L. Kleeman, *Laser scan matching in polar coordinates with application to SLAM*. Edmonton, Canada: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2005.
- [3] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, *Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part I The essential algorithms*. New York, USA: IEEE, Robotics and Automation Magazine, Vol 13, Issue 2, 2008.

Der Mensch im Regelkreis - Steuerungs- und Regelungstechnische Aspekte bei der Ansteuerung eines Fahrsimulators mit Bewegungssystem

Martin Fischer, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI),
Lindholmen Science Park, Lindholmspiren 5, SE-402 78 Göteborg, Schweden,
Tel: ++46-31-7502609, martin.fischer@vti.se

Schlüsselwörter: Motion Cueing, Fahrsimulation, Bewegungssystem

Fahrsimulatoren mit Bewegungssystemen werden zunehmend bei der Entwicklung neuer Komfort- und Sicherheitssysteme für bodengebundene Fahrzeuge eingesetzt. Da die Testergebnisse valide, d. h. in eine reale Fahrsituation übertragbar sein müssen, sind die Anforderungen an alle Teilsysteme einer Fahrsimulation enorm hoch. Der Fahrer muss sämtliche Informationen erhalten, die er benötigt, um das virtuelle Fahrzeug ebenso wie in der Realität zu steuern. Zu den dazu notwendigen Simulationseigenschaften zählt für viele Fahrmanöver und Testszenarien insbesondere eine realistische Rückmeldung der Fahrzeugbeschleunigungen.

Herkömmliche, aus der Flugsimulation stammende Algorithmen zur Steuerung einer Bewegungsplattform [1], auch Motion-Cueing-Algorithmen genannt, haben sich in dieser Hinsicht als unzureichend erwiesen. Aufgrund der hochdynamischen charakteristischen Eigenschaften von Fahrzeugen sind erweiterte oder neue Konzepte zur Umsetzung der Fahrzeugbeschleunigungen notwendig. Hierbei gilt es eine große Anzahl von Limitierungen und Randbedingungen zu beachten. Die größte Herausforderung dabei ist, den Menschen als maßgeblich zu beeinflussendes Objekt beim Entwurf der Bewegungsplattformsteuerung korrekt zu berücksichtigen, da die sehr komplexe menschliche Bewegungswahrnehmung bisher noch nicht vollständig erklärt und modelliert werden kann.

Der Vortrag gliedert sich in zwei wesentliche Teile:

Zunächst werden die Elemente des Regelkreises Fahrsimulator (s. *Abbildung 1*)

erläutert. Der Begriff „Motion Cueing“ bezeichnet dabei die Berechnung der zur Darstellung der Fahrzeugbeschleunigungen geeigneten Simulatorbewegungen unter Berücksichtigung des Arbeitsraumes der Bewegungsplattform sowie der Eigenschaften der menschlichen Bewegungswahrnehmung. Die Bestimmung dieser Bewegungsvorgaben ist zunächst

eine reine Steuerungsaufgabe, da die menschliche Wahrnehmung als Teil der zu regelnden Strecke nicht ausreichend genau modelliert werden kann.

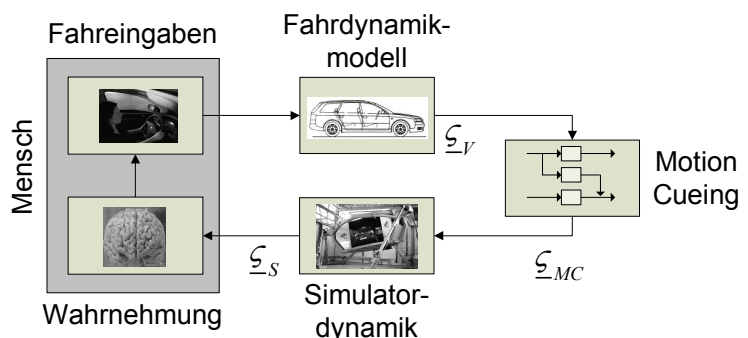


Abbildung 1: Der Mensch im Simulatorregelkreis

Der zweite Teil beschäftigt sich mit dem Entwurf einer modelbasierten Regelung für die in diesem Fall verwendete Hexapod-Bewegungsplattform (s. Abbildung 2). Die Parameter eines von der Struktur her geeigneten Dynamikmodells wurden identifiziert. Die Regelung, welche dieses Modell sowohl im Rückführpfad des Regelkreises als auch in der Vorsteuerung (hier in invertierter Form) verwendet, bewirkt eine deutlich verbessertes Folgeverhalten des Bewegungssystems bei der Darstellung der Motion-Cueing-Signale [2].

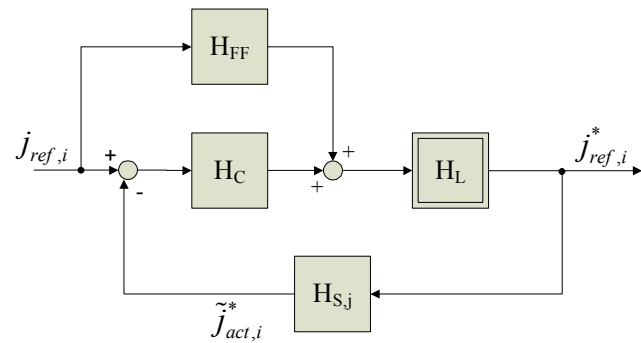


Abbildung 2: Kompensationsregler zur Berechnung der geregelten Positionsvorgaben unter Berücksichtigung der Simulatordynamik

Die Einführung eines neuen Motion-Cueing-Algorithmus sowie die Verwendung der modelbasierten Regelung haben sich als entscheidende Verbesserungen gegenüber bisherigen Ansätzen erwiesen. Dies wird sowohl anhand von Messdaten, als auch durch die, im Rahmen einer Studie ermittelten, subjektiven Bewertungen von Testfahrern belegt.

Der Vortrag beruht auf Ergebnissen, die im Rahmen der Dissertation „Motion-Cueing-Algorithmen für eine realitätsnahe Bewegungssimulation“ am DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik erarbeitet wurden [3].

Literatur:

- [1] Reid, L. D.; Nahon, M. A.: *Flight Simulation Motion-Base Drive Algorithms: Part 1 - Developing and Testing the Equations*. University of Toronto. Toronto. UTIAS Report 296 (1985).
- [2] Lorenz, T.: *Implementierung, Test und Bewertung eines zeitvarianten Algorithmus zur Ansteuerung einer Bewegungsplattform*. Diplomarbeit. Betreut von M. Fischer (DLR) und K. Röbenack (TU Dresden). Dresden. TU Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik (2008).
- [3] Fischer, M.: *Motion-Cueing-Algorithmen für eine realitätsnahe Bewegungssimulation*, Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, Band 5, ISSN 1866-721X, Braunschweig (2009).

Strukturvariable multikriterielle evolutionäre Optimierung und Identifikation von Regelungssystemen

Jan Braun*

* Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik
Technische Universität Dortmund
Otto-Hahn-Str. 4 44227 Dortmund
Telefon: (+49)231 755-2745
Fax: (+49)231 755-2752
E-Mail: jan.braun@tu-dortmund.de

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

** 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: Evolutionäre Optimierung, Strukturoptimierung, optimale Regelung

Optimierungsprobleme mit variabler Struktur und entsprechend adaptiver Repräsentation von Lösungen sind in zahlreichen Anwendungsgebieten Gegenstand der Forschung, wie beispielsweise bei der von Jin und Sendhoff entwickelten Strukturoptimierung von Turbinenschaufeln [1].

Bei der Auslegung eines optimalen Reglers ist neben den Reglerparametern auch die zugrundeliegende Reglerstruktur zu optimieren. Strukturvariabilität tritt ebenfalls bei der Modellierung und Identifikation von Systemen auf. Klassische Evolutionsstrategien sind darauf ausgelegt optimale Lösungen für eine a priori festgelegte Struktur mit einer festen Anzahl von Parametern zu finden.

Dieser Beitrag stellt einen neuartigen Ansatz zur multikriteriellen evolutionären Optimierung von Systemen vor, deren Struktur nicht oder nur unvollständig bekannt ist und daher auf ein Optimierungsproblem mit einer variablen Anzahl von Lösungsparametern führt.

Der vorgestellte Ansatz macht lediglich allgemeine Annahmen über die grundsätzlich zulässigen Strukturen, um so ausgehend von zunächst einfachen Komponenten im Laufe der Evolution durch deren Komposition komplexere Strukturen zu entwickeln. Ein anschauliches Beispiel ist die Optimierung nichtlinearer Verstärkungskennlinien, um im System vorhandene statische Nichtlinearitäten nachzubilden oder zu kompensieren. Eine solche abschnittsweise lineare Kennlinie ist durch ihre Stützstellen definiert, deren Anzahl nicht a priori festzulegen ist. Eine zu geringe Anzahl führt zu einer schlechten Approximation, eine unnötig hohe Anzahl zu einem hochdimensionalen Lösungsraum und einem daher schwer optimierbaren System. Es wird ein evolutionärer Algorithmus verwendet, der parallel zur Optimierung der Lage der Stützstellen sukzessive weitere hinzufügt oder bereits vorhandene Stützstellen entfernt. Der gleiche strukturvariable Ansatz eignet sich für die Optimierung gebrochen rationaler Übertragungsfunktionen. Hier erfolgt die Optimierung der Struktur durch Hinzufügen von Pol- und Nullstellen.

Der evolutionäre Algorithmus generiert in der Anfangspopulation zunächst ausschließlich Lösungen einfacher Struktur, da die Wahrscheinlichkeit eine ansatzweise geeignete Lösung höherer Komplexität zufällig zu erzeugen mit steigender Parameteranzahl rapide abnimmt. In den ersten Generationen findet eine Parameteradaption der einfachen Strukturen statt, ohne dass sich Individuen erhöhter Komplexität behaupten können. Erst wenn das Optimierungspotential einfacher Basiskomponenten ausgereizt ist, treten sukzessive komplexere Lösungsvarianten mit zusätzlichen

Parametern auf, welche den einfacher strukturierten Lösungen überlegen sind. Ein wichtiger Aspekt der strukturvariablen evolutionären Optimierung ist die neutrale Strukturveränderung bei Erhöhung der Parameteranzahl. Das Hinzufügen zusätzlicher Parameter, beispielsweise die Stützstellen einer Kennlinie, erfolgt stets so, dass das Übertragungsverhalten zunächst dem der einfacheren Ausgangslösung entspricht, um die bereits erzielte Optimierung zu erhalten. Ausgehend von der neutralen Erweiterung erkundet die Optimierung die zusätzlichen Freiheitsgrade durch eine Mutation der entsprechenden Parameter.

Die Komplexität der Lösung, messbar an der Anzahl der benötigten Parameter, wird als zusätzliches Kriterium der im Allgemeinen multikriteriellen Optimierung verwendet, um die Generierung unnötig komplexer Systeme zu verhindern. Die resultierende pareto-optimale Lösungsmenge bietet dem Experten im Nachgang an die Optimierung die Möglichkeit, den für ihn optimalen Kompromiss zwischen Komplexität und Güte der Lösung zu wählen. So lassen sich beim Systementwurf die Kosten höherer Komplexität und die Verbesserung der Funktionalität objektiv gegeneinander abwägen.

Die strukturvariable Optimierung eignet sich gleichermaßen für die Systemidentifikation als auch für den Entwurf von Reglern. Als vorteilhaft erweist sich dabei die hohe Freiheit bezüglich der im System auftretenden Übertragungsglieder und ihrer Komposition. So lassen sich unterschiedliche Kennlinien und Übertragungsfunktionen gleichzeitig und in beliebigen Kombinationen optimieren. Möglich ist auch das Einbeziehen weiterer Übertragungsglieder wie zum Beispiel Totzeit, Stellwertbeschränkungen oder Hysterese.

Die Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit des Ansatzes für reale Problemstellungen wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, anhand der evolutionären multikriteriellen Optimierung eines Reglers für hydraulische Wegeventile aufgezeigt. Die Ergebnisse belegen, dass der hier dargestellte evolutionäre Algorithmus in der Lage ist, diejenigen optimalen Reglerstrukturen und -parameter zu finden, die denen des klassischen Reglerentwurfs bei vorgegebener Struktur entsprechen.

Literatur:

[1] Jin, Y.; Sendhoff, B.: A systems approach to evolutionary multi-objective structural optimization and beyond. In: *IEEE Computational Intelligence Magazine*, IEEE, Bd. 4, Nr. 3, S. 62–76, Aug 2009.

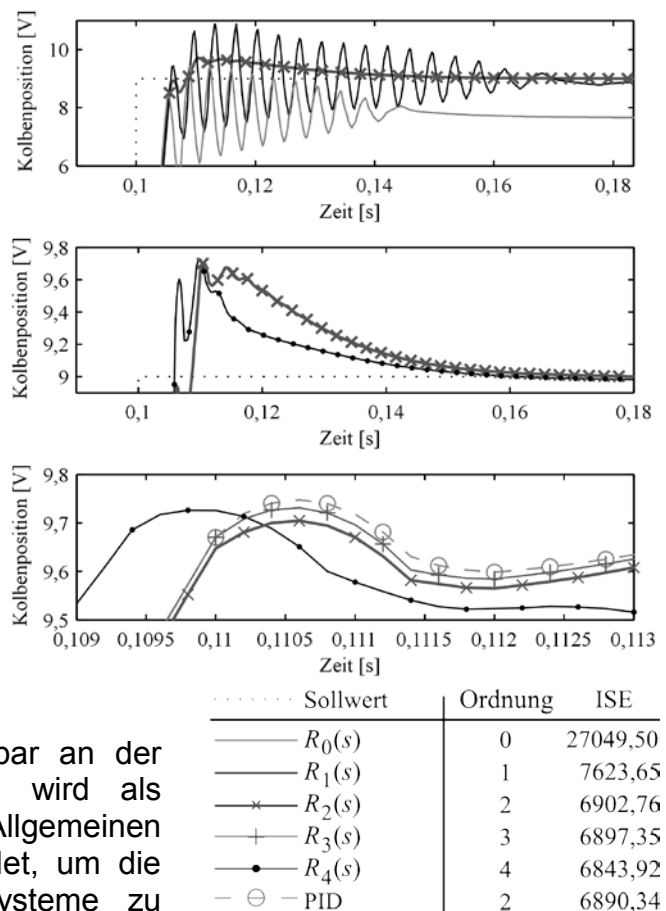


Abbildung 1: Ergebnisse einer Regler-Optimierung

Parametrische Modellreduktion in hierarchisch modellierten selbstoptimierenden Systemen

Martin Krüger *

Heinz Nixdorf Institut
Regelungstechnik und Mechatronik
Universität Paderborn
Pohlweg 98
Tel. 05251 / 60 5568
Fax 05251 / 60 5579
martin.krueger@rtm.upb.de

Schlüsselwörter: Parametrische Modellreduktion, Selbstoptimierung, hierarchische Modellierung, Krylov-Unterräume, Moment-Matching

Einen wichtigen Baustein der Selbstoptimierung ([1]) stellt die modellbasierte Mehrzieloptimierung dar, mit deren Hilfe eine optimale Erfüllung der Systemziele in Abhängigkeit der Systemparameter möglich ist. Als Grundlage dazu ist ein geeignetes mathematisches Modell, welches das Systemverhalten nachbildet, erforderlich. Zur Gewinnung derartiger Modelle ist ein funktionsorientiertes Strukturierungskonzept für mechatronische Systeme entwickelt worden, das zum Aufbau hierarchischer Modelle genutzt wird. Innerhalb der Modellhierarchie wird zur Verringerung der Komplexität der Wissensaustausch über reduzierte Modelle realisiert.

Innerhalb des Selbstoptimierungsprozesses können verschiedene Optimierungsverfahren zum Einsatz kommen. Eine Möglichkeit besteht darin, während des Entwurfsprozesses zu bekannten Zielen die resultierende Paretomenge, welche die Menge der optimalen Kompromisse darstellt, zu berechnen. Dies erfolgt über ein spezielles Optimierungsmodell, in das neben einem Umgebungs- und einem Bewertungsmodell auch das geregelte Modell der Strecke eingeht. Die Reglerparameter stellen dabei die Optimierungsvariablen dar. Bisher wird nach jeder Parameteränderung ein neues reduziertes Modell der Strecke erzeugt und in das Optimierungsmodell eingefügt. Durch parameterabhängige reduzierte Modelle soll dieser Prozess zukünftig vereinfacht werden. Da sich zur Laufzeit die physikalischen Parameter wie etwa die Masse des Systems ändern können, ist es im Betrieb von Vorteil, den Einfluss der geänderten Parameter auf das Systemverhalten in einfacher Weise abschätzen zu können. Auch in diesem Bereich sollen zukünftig parameterabhängige reduzierte Modelle zum Einsatz kommen.

Den Ausgangspunkt des untersuchten parametrischen Modellreduktionsverfahrens bildet ein lineares dynamisches System. Das angewandte Reduktionsverfahren basiert auf einem impliziten Abgleich der Momente der Übertragungsfunktion ([2]). Die notwendigen Projektionsmatrizen, mit deren Hilfe das reduzierte Modell aufgebaut wird, werden über einen zweiseitigen Arnoldi-Algorithmus bestimmt. In die Berechnung fließt dabei der in [3] vorgeschlagene rekursive Ansatz ein.

Analog zu nicht-parametrischen Modellreduktionsverfahren auf der Basis von Krylov-Unterräumen ([4]) werden für den Aufbau geeigneter Projektionsmatrizen sowie als Abbruchkriterium die Informationen innerhalb des Orthonormalisierungsschrittes verwendet. Im Hinblick auf die Zielsetzung, dass die reduzierten Modelle innerhalb eines Optimierungsverfahrens eingesetzt werden sollen, ist das Verfahren um zusätzliche Abbruchkriterien erweitert worden, welche die Stabilität des reduzierten Modells garantieren.

Als Anwendungsbeispiel dient ein Modell eines Prüfstands für die aktive Feder/Neige-Technik des Schienenfahrzeugs RailCab. Der Prüfstand bildet ein Halbfahrzeug mit drei Freiheitsgraden für die Aufbaubewegung nach. Neben der Aufbau- masse umfasst er zwei symmetrisch angeordnete Aktormodule, die jeweils aus drei Hydraulikzylindern und einer Umlenkkinematik bestehen. Der Prüfstand kann mittels einer Anregungseinheit in allen drei Freiheitsgraden angeregt werden.

Literatur:

- [1] ADEL, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PODLOGAR, H.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: *Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte*, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2008.
- [2] DANIEL, L.; SIONG, O. C.; CHAY, L. S.; LEE, K. H.; WHITE, J.: *A Multiparameter Moment-Matching Model Reduction Approach for Generating Geometrically Parameterized Interconnected Performance Models*, In: *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vancouver, 2004.
- [3] BENNER, P.; FENG, L.: *A Robust Algorithm for Parametric Model Order Reduction*, In: *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 7, Nr. 1, S. 1021501-1021502, 2008.
- [4] LOHMANN, B.; SALIMBAHRAMI, B.: *Ordnungsreduktion mittels Krylov-Unterraummethoden*, at - Automatisierungstechnik, Vol. 52, Nr. 1, 2004.

Adaption and Formalization of UML for Open-Loop Control

Daniel Witsch*

* Lehrstuhl für Informationstechnik im
Maschinenwesen
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching bei München

Tel: +49.89.289.16409
Fax: +49.89.289.16410
witsch@itm.tum.de

Birgit Vogel-Heuser**

** Lehrstuhl für Informationstechnik im
Maschinenwesen
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching bei München

Tel: +49.89.289.16400
Fax: +49.89.289.16410
vogel-heuser@itm.tum.de

Schlüsselwörter: UML, IEC 61131-3, open-loop control, software-development

By supporting interdisciplinary communication and clarifying the structural and behavioral aspects of control software, model-based engineering approaches can significantly enhance the industrial software engineering process. The Unified Modeling Language (UML) [1] constitutes the state-of-the-art regarding model-based software development in most domains. However its application for control software development is still in its primacy. The semantic gap between IEC 61131-3 [2] as a procedural programming language and UML as modeling language for object oriented systems may be seen as one reason for this.

On the other hand IEC 61131-3 supports graphical programming languages (e.g. sequential function chart) as one main feature, which may be seen as similarity to a model-based development approach. Intentionally these graphical programming languages like function-block or ladder-diagram were once introduced to ease PLC programming for people coming from electrical engineering.

UML on the other hand is a harmonized collection of modeling notations coming from different disciplines [3]. The harmonization was done by defining the different diagram types on a common formalism (meta model) and by underlying common object oriented principles for communication (e.g. events) and structuring data (classifiers, instantiation).

Within a research project [4] a subset of UML was integrated into an IEC 61131-3 programming environment. More precisely class-, activity- and state diagrams were realized as new editors, which stand next to common IEC 61131-3 language. As an effect state diagrams and activity diagrams can be used as implementation language of function blocks analogous to ladder diagrams for example [5].

Objective of this research is to identify a useful subset of UML for open-loop control software engineering and to integrate it with the existing IEC 61131-3 languages. The selection of the UML diagrams to integrate was driven by requirements of industrial experts [6]. Moreover, it was necessary to adapt the subset UML according to the technical requirements (cyclic behavior, signal-based) of IEC 61131-3 and to specify

an unambiguous syntax and semantic for the adapted subset of UML. For behavioral diagrams (state and activity) the semantic specification includes the formal specification of their execution in the context of PLC-cycles.

The class diagrams as structural diagram shows how function blocks or user-defined data-types respectively depend on each other. It can be used to create new software-structures or to visualize given software structures (reengineering). Therefore it was necessary to define a bidirectional mapping between class-diagrams and the structural information in IEC 61131-3. These class-diagram mapping definitions cover also the object-oriented extensions of IEC 61131-3 implemented in CoDeSys V3 [7].

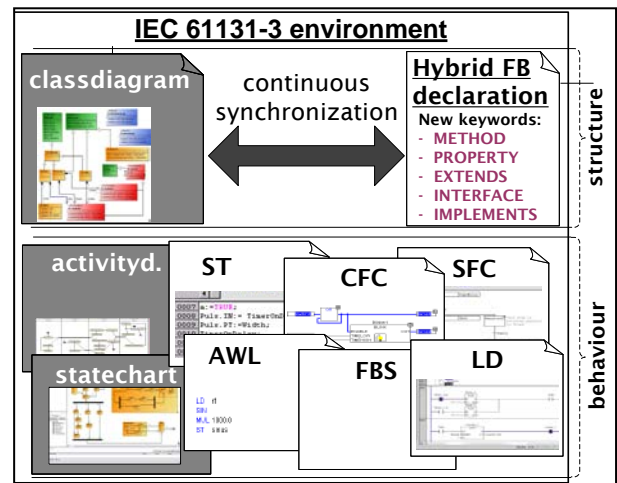


Abbildung 1: Integration of UML-diagrams in IEC 61131-3 programming environment

Literatur:

- [1] Object Management Group: Unified Modeling Language, V1.4.2, ISO/IEC 19501, <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/05-04-01>.
- [2] International Electrical Commission, IEC 61131 Programmable Controllers – Part 3 : Programming Languages.
- [3] Rumbaugh, J.; Jacobson, I.; Booch, G.: The Unified Modeling Language Reference Manual, Second Edition, Addison-Wesley, Boston, 2005.
- [4] B. Vogel-Heuser (ed.), Automation & Embedded Systems- Effizienzsteigerung im Engineering, Kassel University Press, Kassel, 2009.
- [5] Witsch, D., U. Schünemann: UML zur technologieorientierten Spezifikation von Steuerungssoftware. In atp – Automatisierungstechnische Praxis, Heft 06/2009.
- [6] Witsch, D., Vogel-Heuser, B.: Anforderungsorientierter Entwurf eines UML basierten Software-Entwicklungswerkzeuges für die Steuerungsprogrammierung. In Tagungsband GMA-Kongress Automation 2008, Baden Baden, 03.-04.06.2008.
- [7] Witsch, D., B. Vogel-Heuser: Close integration between UML and IEC 61131-3: New possibilities through object-oriented extensions. In Proc. of ETFA 2009 - 14th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Palma de Mallorca, Spain, 21.-26.09.2009.

Systematischer modellbasierter Entwurf verteilter Steuerungen nach IEC 61499

Dipl.-Ing. Martin Hirsch *

Prof. Dr.-Ing. Hans-Michael Hanisch **

* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik/Institut für Informatik
Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg
06099 Halle Saale
Telefon 0345-55-25975
Fax 0345-55-27304
E-Mail martin.hirsch@informatik.uni-halle.de

** Lehrstuhl für Automatisierungstechnik/Institut für Informatik
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
06099 Halle Saale
Telefon 0345-55-25970
Fax 0345-55-27304
E-Mail hans-michael.hanisch@informatik.uni-halle.de

Schlüsselwörter: Verteilte Systeme, SysML, IEC 61499, Modellbasierter Entwurf, Verifikation

In der Automatisierungstechnik tauchen in den letzten Jahren vermehrt Schlüsselwörter wie verteilte Automatisierung, einfache Rekonfigurierbarkeit sowie Wiederverwendbarkeit von Automatisierungskomponenten auf. Zusammengefasst bedeutet das große neue Herausforderungen an die Hersteller von Automatisierungslösungen, um die neu geforderte Flexibilität gewährleisten zu können. So müssen zum Einen Spezifikationstechniken entwickelt und angewendet werden, die der Komplexität verteilter Systeme gerecht werden und nicht schon in der Phase der Spezifizierung für erhöhte Verwirrung sorgen. Zum Anderen müssen aber auch aktuelle Lösungen für die softwaretechnische Realisierung der Automatisierung nach und nach durch neuere, flexiblere Ansätze ersetzt werden. Die Möglichkeit der Verifizierbarkeit von Automatisierungslösungen sollte in diesem Kontext auch nicht außer Acht gelassen werden.

In den letzten Jahren haben sich verschiedene Technologien zum modellbasierten Steuerungsentwurf herausgebildet, auf welche in diesem Beitrag eingegangen werden soll. Diese Technologien werden methodisch miteinander verknüpft, um eine glatte Ingenieursarbeit ohne Bruchstellen zu gewährleisten. Die einzelnen Schritte der hier vorgestellten Vorgehensweise (siehe Abbildung 1) können aber auch entkoppelt voneinander betrachtet und in einem eigenen Kontext bewertet werden.

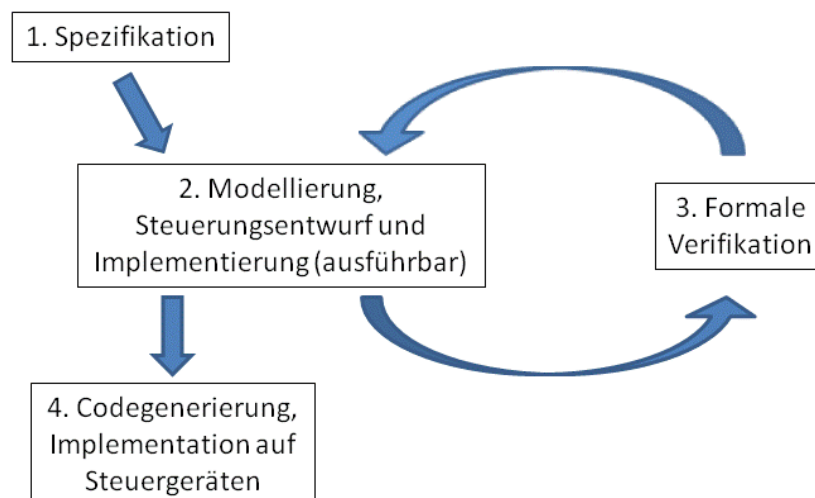


Abbildung 1: Vorgehensweise zum modellbasierten Steuerungsentwurf

Um Anforderungen an ein Automatisierungssystem zu formulieren, sind textuelle Spezifikationen heutzutage ein gängiges Mittel. In diesem Beitrag wird auf die Spezifizierung von Systemen mit der Sprache SysML eingegangen, welche bei sinnvoller und ausgesuchter Anwendung etliche Vorteile mit sich bringt. So werden textuell formulierte Anforderungen systematisch mit Diagrammen unterschiedlicher Diagrammformen beschrieben, welche sowohl die Struktur als auch das Verhalten eines Systems beschreiben können. Hierbei werden durch Einhaltung von Modellierungsrichtlinien Eindeutigkeit und Konsistenz gewährleistet, welche schließlich in der ersten Simulation des Systems schon in der Spezifikationsphase münden.

Die softwaretechnische Lösung zur Automatisierung wird in diesem Beitrag mit dem Standard 61499 der IEC vorgenommen. Dieser Standard ist eine streng komponentenorientierte Weiterentwicklung der IEC 61131 und wurde speziell zum Entwurf verteilter Systeme entwickelt. Die zuvor erstellte Spezifikation kann hierbei entweder komplett verwendet werden, um Systemkonfigurationen zu generieren, es ist aber auch möglich, nur Teile der Spezifikation zum Systementwurf zu verwenden. Der Standard bietet die Möglichkeit ein System funktional vollständig zu beschreiben, Applikationen können frei im System verteilt und integriert werden. Durch die Portierbarkeit der ereignisgetriebenen Steuerungsapplikationen auf verschiedene Hardware ergibt sich die Möglichkeit der Interoperabilität von Geräten verschiedener Hersteller. In diesem Beitrag wird speziell auf Vorgehensweisen zum verteilten Steuerungsentwurf eingegangen, die die Wiederverwendbarkeit von Steuerungskomponenten im Besonderen gewährleisten.

Die Möglichkeit der Verifizierbarkeit des modellbasierten Steuerungsentwurfes ergibt sich unter Verwendung von Net-Condition/Event Systemen (NCES). Diese Modellform mit formalem Hintergrund beinhaltet neben der Eigenschaft der Modularität auch Ereignis- und Datenverbindungen und fügt sich somit nahtlos der IEC 61499 an.

Die nach IEC 61499 erstellten Modelle der Strecke werden im letzten Schritt mit Service Interface Function Blocks substituiert. Diese ermöglichen den Zugriff auf die verwendete Steuerungshardware. In diesem Beitrag wird abschließend die Implementation des modellbasierten Steuerungsentwurfs anschaulich an verschiedenen Beispielanlagen demonstriert.

Generische Erzeugung von PFD-Rechenmodellen für PLT-Schutzeinrichtungen

Thomas Gabriel

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Technische Universität Kaiserslautern
Erwin-Schrödinger-Str. 12, 67663 Kaiserslautern
Tel.: 0631/205-4454
Fax: 0631/205-4462
gabriel@eit.uni-kl.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Litz

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Technische Universität Kaiserslautern
Erwin-Schrödinger-Str. 12, 67663 Kaiserslautern
Tel.: 0631/205-4450
Fax: 0631/205-4462
litz@eit.uni-kl.de

Seit Erscheinen der IEC 61511:2003 [1] für die Prozessindustrie ist der quantitative Nachweis der Qualität von automatisierten Schutzeinrichtungen verpflichtend geworden. Für PLT-Schutzeinrichtungen, das sind Mess-, Auswert- und Schaltfunktionen, die mit Mitteln der Prozessleittechnik realisiert werden, muss seit dem die PFD (Probability of Failure on Demand) als ausschlaggebende sicherheitstechnische Kenngröße bestimmt werden. Diese „Wahrscheinlichkeit der Unverfügbarkeit einer Schutzeinrichtung im Moment der Anforderung“ kann mit unterschiedlichen mathematischen Methoden ermittelt werden. Die Norm selbst bietet eine Reihe von parametrierbaren Formeln an, über die die PFD einer gegebenen PLT-Schutzeinrichtung bestimmt werden kann. Weiterhin verweist IEC 61511 auf zulässige Modellierungsansätze wie Fehlerbäume, Zuverlässigkeitsblockdiagramme oder Markovmodelle [2].

Der für Betreiber von Chemieanlagen einfachste Weg ist die Anwendung der Standardformeln, die in vereinfachter Form auch Einzug in deutsche Folgenormen gefunden haben [6]. Mit diesen lässt sich die PFD eines Teils der bereits existierenden sowie der in Planung befindlichen PLT-Schutzeinrichtungen normkonform berechnen. Jedoch ist seit 2003 deutlich geworden, dass die Standardformeln nicht ausreichen. Zum einen sind sie hinsichtlich ihrer Parametrierfähigkeiten deutlich beschränkt (ausschließlich homogen instrumentierte Systeme, gemeinsames Prüfintervall für alle Komponenten eines Teilsystems usw.). Zum anderen existieren Formeln nur für wenige und statische Standard-Redundanzstrukturen (1oo1, 1oo2, 2oo3 usw.).

Die Verunsicherung unter den Anlagenbetreibern ist groß, da das benötigte Know-how für die korrekte Anwendung der in [2] spezifizierten Modellierungsansätze nur in Ausnahmefällen vorhanden ist. Oftmals liegen somit zwar subjektiv sichere Schutzkonzepte vor, deren Verfügbarkeit jedoch für den Betreiber nicht numerisch nachweisbar ist. Diese mathematische Barriere wirkt zusätzlich innovationshinderlich, als moderne Konzepte zu Gerätediagnose oder nicht standardisierter MooN-Redundanz (z.B. Degradation) nicht auf eine rechtssichere Form gebracht werden können und somit schlicht nicht eingesetzt werden dürften.

Zwar existieren unzählige Softwarelösungen, jedoch lassen diese sich zumeist in zwei Gruppen einteilen: Die eine implementiert lediglich die Standardformeln oder bietet parametrierbare Rechenmodelle für nur wenige zusätzliche Systemstrukturen an. Die andere stellt im Allgemeinen ein unbeherrschbares Expertensystem dar, das vom Nutzer eine starke Abstraktion der geräte- und softwaretechnisch vorliegenden Struktur verlangt.

Somit scheiden die meisten verfügbaren Softwarepakete mangels Flexibilität oder Komplexität als brauchbare Lösung für aktuelle Problemstellungen in der Sicherheitstechnik aus.

Dieser Vortrag soll eine Möglichkeit aufzeigen, mit der Anlagenbetreibern die PFD-Berechnung beliebiger Schutzeinrichtungen gelingen kann, ohne selbst ein konkretes mathematisches Verhaltensmodell aufstellen zu müssen. Das Konzept basiert auf einer strukturierten Beschreibungssprache, mit der – ähnlich Funktionsbausteinen in CAE-Tools – eine formale Darstellung der PLT-Schutzeinrichtung gelingt. Hierbei können sowohl architekturelle als auch strukturelle Aspekte, sowie Verhaltens- und Wartungsstrategien berücksichtigt werden [7].

Ausgehend von einer solchen Systembeschreibung gelingt über Transformationsvorschriften die generische Erzeugung mathematischer Rechenmodelle [5] mit denen die Bestimmung der geforderten Kenngrößen möglich ist. Hierbei werden zum einen Markovmodelle, zum anderen Petrinetze für eine Monte-Carlo-Simulation generiert. Beide Ansätze sind seit langem weit verbreitet [4] und über die neue IEC 61508:2009 [3] in ihrer Anwendung für den Bereich der Funktionalen Sicherheit legitimiert. Eine Kombination beider Methoden liefert für beliebige mit dem vorgestellten Ansatz beschreibbare PLT-Schutzeinrichtung ein generisch erzeugtes Rechenmodell, mit dem normkonform eine numerische Klassifizierung erfolgen kann.

Da das unterliegende Komponentenfehlermodell auch betriebstechnische Fehlerzustände berücksichtigt, können neben den sicherheitstechnischen Kenngrößen auch betriebstechnische wie die PTS (Probability of Tripping Spuriously) ermittelt werden. Hierauf basierend kann gezeigt werden, dass die Berücksichtigung der betrieblichen Verfügbarkeit Einfluss auf die PFD nach sich zieht, sie unter Umständen sogar verbessern kann.

Es ergibt sich ein ganzheitlicher Lösungsansatz zur Optimierung von Anlagensicherheit und betrieblicher Verfügbarkeit für beliebig strukturierte PLT-Schutzeinrichtungen.

Literatur:

- [1] DIN EN / IEC 61511:2003: „Funktionale Sicherheit – Sicherheitstechnische Systeme für die Prozessindustrie“, 2005.
- [2] DIN EN / IEC 61508:1998: „Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme“, 2002.
- [3] IEC 61508:2009: „Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems“, 2009.
- [4] Börcsök, J.: „Elektronische Sicherheitssysteme“, Hüthig Verlag, 2004, Heidelberg.
- [5] Gabriel, T.; Litz, L.; Schrörs, B.: „A formal approach to derive configurable Markov models for arbitrarily structures safety loops“, Proceedings of the 9th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM9), Hong Kong (China), 2008.
- [6] VDI/VDE 2180-4:2007: „Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik mit Mitteln der Prozessleittechnik (PLT) – Berechnungsmethoden für Zuverlässigkeitskenngrößen von PLT-Schutzeinrichtungen“, 2007.
- [7] Gabriel, T.; Litz, L.; Schrörs, B.: „Systematic approach for the SIL-proof of non-standard safety-loops“, Proceedings of the 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe, PCIC Europe, Weimar, 2008, pp. 171 - 178.

Störkompensation durch ereignisbasierte Regelung

Daniel Lehmann *

Jan Lunze **

* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und
Prozessinformatik (ATP)
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum
Tel. 0234 32 24072
Fax 0234 32 14101
lehmann@atp.rub.de

** Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und
Prozessinformatik (ATP)
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum
Tel. 0234 32 24071
Fax 0234 32 14101
lunze@atp.rub.de

Schlüsselwörter: Ereignisbasierte Regelung, Zustandsrückführung, Störkompensation, Digital vernetzte Regelungssysteme

Das Ziel der ereignisbasierten Regelung ist es, die über ein digitales Netzwerk stattfindende Kommunikation von Regelkreiskomponenten zu verringern, um damit die Netzbelastung zu reduzieren. Dafür werden nur dann Daten über den Rückführzweig des Regelkreises übertragen, wenn ein Ereignis eine zu große Regelabweichung signalisiert. Die ereignisbasierte Regelung wirft neue theoretische Fragen auf, weil die Grundannahme der Abtastregelung, dass der Informationsaustausch zwischen Regelstrecke und Regler zeitperiodisch erfolgt, nicht erfüllt ist.

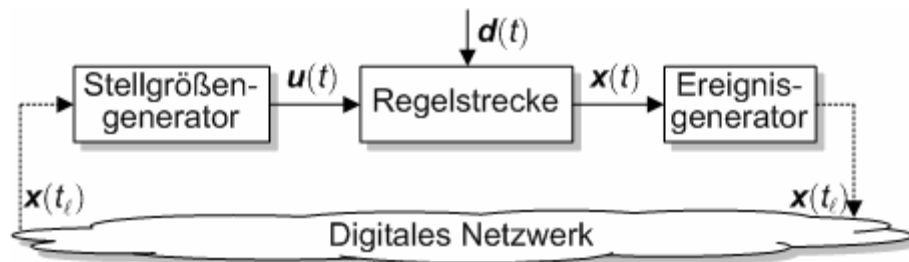


Abbildung 1: Ereignisbasierter Regelkreis

Die Struktur des ereignisbasierten Regelkreises ist in Abb. 1 dargestellt. Der Regelkreis besteht aus der Regelstrecke, einem Stellgrößengenerator und einem Ereignisgenerator. Der Ereignisgenerator bestimmt in Abhängigkeit vom Regelstreckenzustand $x(t)$ den Ereigniszeitpunkt t_i zu dem der Regelkreis geschlossen und der Systemzustand $x(t_i)$ an den Stellgrößengenerator übertragen wird. Der Stellgrößengenerator erzeugt ausgehend von den zum Ereigniszeitpunkt erhaltenen Daten das kontinuierliche Stellsignal zwischen zwei Ereigniszeitpunkten. Die durchgezogenen Linien in Abb. 1 kennzeichnen einen kontinuierlichen Datenaustausch, wohingegen die gestrichelten Linien eine nur zu den Ereigniszeitpunkten bestehende Kommunikation kennzeichnen.

Der Vortrag erläutert eine ereignisbasierte Regelungsstrategie, die auf dem Konzept der kontinuierlichen Zustandsrückführung basiert. Der Stellgrößengenerator erzeugt dabei die Stellsignale mit Hilfe eines Modells des kontinuierlichen Regelkreises, so dass die Stellsignale zwischen zwei Ereigniszeitpunkten nicht wie bei einer

konventionellen Abtastregelung konstant sind, sondern den für kontinuierliche Regelungen typischen exponentiellen Verlauf aufweisen.

Ereignisse werden immer dann durch den Ereignisgenerator erzeugt, wenn der gemessene Zustand $\mathbf{x}(t)$ vom prädizierten Modellzustand $\mathbf{x}_s(t)$ um eine vordefinierte Schranke \bar{e} abweicht. Der für den Vergleich benötigte Modellzustand wird im Ereignisgenerator wie im Stellgrößengenerator durch ein Modell des Regelkreises mit einer kontinuierlichen Zustandsrückführung bestimmt. Wenn die Bedingung $\|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_s(t)\| = \bar{e}$ erfüllt ist, wird ein Ereignis generiert, der Systemzustand $\mathbf{x}(t_i)$ vom Ereignisgenerator zum Stellgrößengenerator übertragen und die Modelle sowohl im Stellgrößengenerator als auch im Ereignisgenerator mit dem wahren Zustand $\mathbf{x}(t_i)$ reinitialisiert.

Die Hauptergebnisse des Vortrags zeigen wichtige Eigenschaften des ereignisbasierten Regelkreises. So garantieren die Verwendung des betrachteten ereignisbasierten Regelungskonzepts und die Art der Ereignisgenerierung, dass die Abweichung zwischen realem und prädiziertem Verhalten beschränkt bleibt. Darauf aufbauend konnte gezeigt werden, dass die Abweichung des Verhaltens des ereignisbasierten Regelkreises vom Verhalten des kontinuierlich realisierten Regelkreises ebenfalls beschränkt ist, so dass die Stabilität des kontinuierlichen Regelkreises die Stabilität des ereignisbasierten Regelkreises sichert. Die maximal mögliche Abweichung kann durch eine entsprechende Wahl der Schranke \bar{e} beliebig eingestellt werden. Ein betragsmäßig großer Wert für \bar{e} führt zu einer Reduktion der Kommunikation, wohingegen ein Verkleinern von \bar{e} und damit verbunden eine bessere Approximation der kontinuierlichen Regelung durch die ereignisbasierte Regelung eine Erhöhung in der Kommunikationshäufigkeit bedingt.

In diesem Zusammenhang konnte eine obere Schranke für die Kommunikationshäufigkeit im ereignisbasierten Regelkreis abgeleitet werden. Daneben konnte gezeigt werden, dass abhängig von \bar{e} durch die ereignisbasierte Regelung kleine Störungen toleriert werden, in dem Sinne, dass überhaupt keine Daten über das Netzwerk übertragen werden.

Das Verhalten der ereignisbasierten Regelung wird anhand von Simulationen und Experimenten an einem verfahrenstechnischen Prozess demonstriert.

Literatur:

- [1] Lunze, Lehmann: A state-feedback approach to event-based control. *Automatica* (akzeptiert)
- [2] Lehmann, Lunze: Event-based control: a state-feedback approach. In *Proc. of 10th European Control Conf.*, pp. 1716—1721, Budapest, Hungary
- [3] L. Grüne, S. Jerg, O. Junge, D. Lehmann, J. Lunze, F. Müller and M. Post: Two complementary approaches to event-based control. *at-Automatisierungstechnik* (eingereicht)

Dynamische Programmierung für hybride dynamische Systeme

Matthias Rungger

Olaf Stursberg

Regelungs- und Systemtheorie
Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
Universität Kassel
Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel
+49 (0) 561 804 6494
+49 (0) 561 804 6384
{matthias.rungger, stursberg}@uni-kassel.de

Schlüsselwörter: Dynamische Programmierung, Optimale Regelung, Hybride Systeme

Dieser Beitrag beschreibt die Berechnung von optimalen Regelgesetzen für hybride dynamische Systeme mit Hilfe dynamischer Programmierung. Hybride Systeme vereinigen kontinuierliche Dynamiken mit diskreten Ereignissen und sind für die Darstellung des Verhaltens einer Vielzahl von Anwendungen eine geeignete Modellform. Ein Beispiel ist die Beschreibung der Dynamik eines Fahrzeugmotors, wenn der Effekt eines Gangwechsels als diskretes Ereignis auf das Verhalten kontinuierlich veränderlicher Größen, wie der Drehzahl oder dem Antriebsmoment, zu modellieren ist. Die Wechselwirkung beider Typen von Dynamiken erfordert besondere Mechanismen im Reglerentwurf, insbesondere wenn diskrete und kontinuierliche Freiheitsgrade zu berücksichtigen sind.

Die Theorie der dynamischen Programmierung, die für ausschließlich kontinuierliche Systeme lange etabliert ist, wurde in [1] auf eine allgemeine Klasse von hybriden Systemen erweitert. Die zentrale Rolle dieser Theorie nimmt die Wertefunktion ein, die für jeden Zustand im hybriden Zustandsraum die optimalen Kosten für den Übergang zum Zielzustand (oder -gebiet) formuliert. Ist die Wertefunktion bekannt, kann das optimale Regelgesetz als Funktion vom aktuellen hybriden Zustand berechnet werden. Allerdings ist die Wertefunktion als Lösung der Sequenz von Mengen partieller Differentialgleichungen gegeben, für die nur in Ausnahmefällen eine analytische Lösung bestimmt werden kann. Dieser Beitrag beschäftigt sich daher mit der numerischen Approximation der Wertefunktion für hybride Systeme.

Zur numerischen Berechnung der Wertefunktion wird hier für ein hybrides System mit optimal zu bestimmenden kontinuierlichen und schaltenden Eingängen sowie autonom schaltenden Dynamikwechseln das dynamische Verhalten durch eine Markov-Kette approximiert. Die Zustände der Markov-Kette repräsentieren die Gitterpunkte eines uniformen Gitters im hybriden Zustandsraum. Die Transitionswahrscheinlichkeiten werden aus einer schrittweisen Evaluierung der hybriden Dynamik ermittelt, wobei sowohl die approximative Lösung der Differentialgleichungen als auch die Auswertung der diskreten Ereignisse (mit möglichem Sprung kontinuierlicher Zustände) eingeht. Die Zeitschrittweite resultiert dabei adaptiv aus dem Betrag der Dynamik und der Gitterpunktabstände.

Die Wertefunktion der approximierenden Markov-Kette wird durch eine iterative Berechnung bestimmt, wobei in jedem Schritt die Wertefunktionswerte in allen

Gitterpunkten aktualisiert und zwischen den Gitterpunkten lineare Interpolationen verwendet werden. Das approximativ optimale Regelgesetz erhält man dann durch stückweise Differentiation der Wertefunktion der Markov-Kette. Zur Betrachtung der Effizienz und Approximationsgüte der Berechnung wird neben der Verwendung eines uniformen Gitters der Einsatz einer adaptiven Gitterweite diskutiert. Zusätzlich behandelt der Vortrag die Konvergenz des Berechnungsansatzes für verschwindende Gitterweiten.

Zur Illustration der Vorgehensweise wird (u.a.) das Beispiel der Berechnung einer zeitoptimalen Fahrtrajektorie eines Fahrzeugs mit zwei Gängen behandelt. Die Abbildung 1 zeigt als Beispiel im linken Teil die Wertefunktion über dem kontinuierlichen Teil des Zustandsraums und im rechten Teil die optimierte Trajektorie für den zeitoptimalen Übergang von einem Startpunkt $(0, -5)$ in den Ursprung.

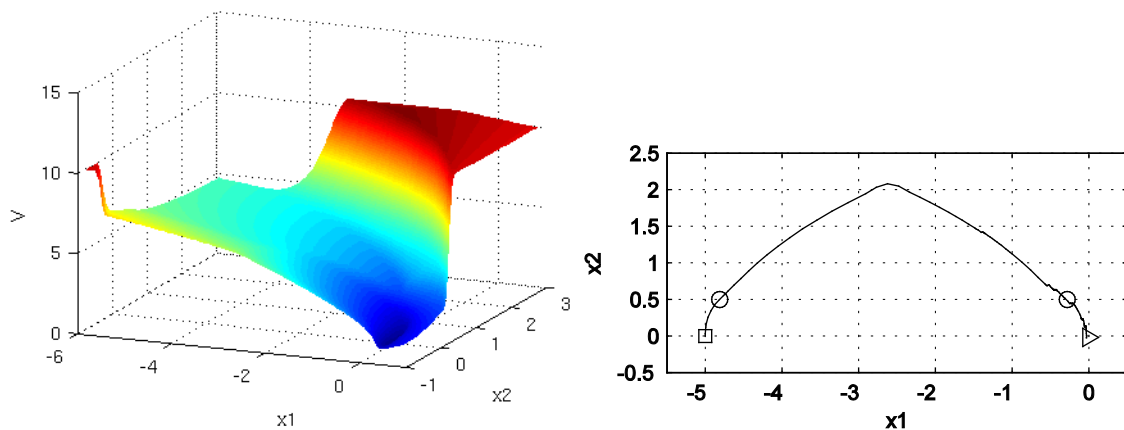


Abbildung 1: Verläufe der Wertefunktion und Systemtrajektorie im Zustandsraum. Die Kreise markieren Schaltpunkte der Dynamik.

Literatur:

- [1] M. S. Branicky, V. S. Borkar und S. K. Mitter: A Unified Framework for Hybrid Control: Model and Optimal Control Theory. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 43(1):31–45, 1998.
- [2] M. Rungger und O. Stursberg: Function Approximation for the Deterministic Hamilton-Jacobi-Bellman Equation. 48th IEEE Conference on Decision and Control, 2009.
- [3] M. Rungger und O. Stursberg: Optimal Control for Deterministic Hybrid Systems using Dynamic Programming. 3rd IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems, 316-321, 2009.

Optimierte Instandhaltung von Eisenbahninfrastrukturen

L. Quiroga, E. Schnieder

Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik
Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig
Tel: +49 531 391 3313
E-Mail: {quiroga|schnieder@iva.ing.tu-bs.de}

Schlüsselwörter: Eisenbahn, Instandhaltung, Zuverlässigkeit, Petrinetz, Monte Carlo

Die Instandhaltung von Eisenbahninfrastrukturen ist eine Aufgabe, die sowohl menschliche als auch technologische kostspielige Ressourcen einfordert. Ihr Ziel ist die Gewährleistung der Systemfunktionalität unter Minimierung der Lebenszykluskosten. Die Planung der Instandhaltung des Systems Gleis gewinnt bei den europäischen Eisenbahnbetreibern immer stärker an Relevanz. Die antreibende Kraft ist die Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen Verkehrsmitteln ohne die historischen Kerneigenschaften Sicherheit, Zuverlässigkeit und Fahrtdomfort zu vernachlässigen. Eine solche Verbesserung führt sowohl zu höheren Geschwindigkeiten und Taktfrequenzen, als auch zur Beibehaltung wettbewerbsfähiger Preise. Allerdings folgt aus den höheren Geschwindigkeiten eine gesteigerte Gleisbeanspruchung.

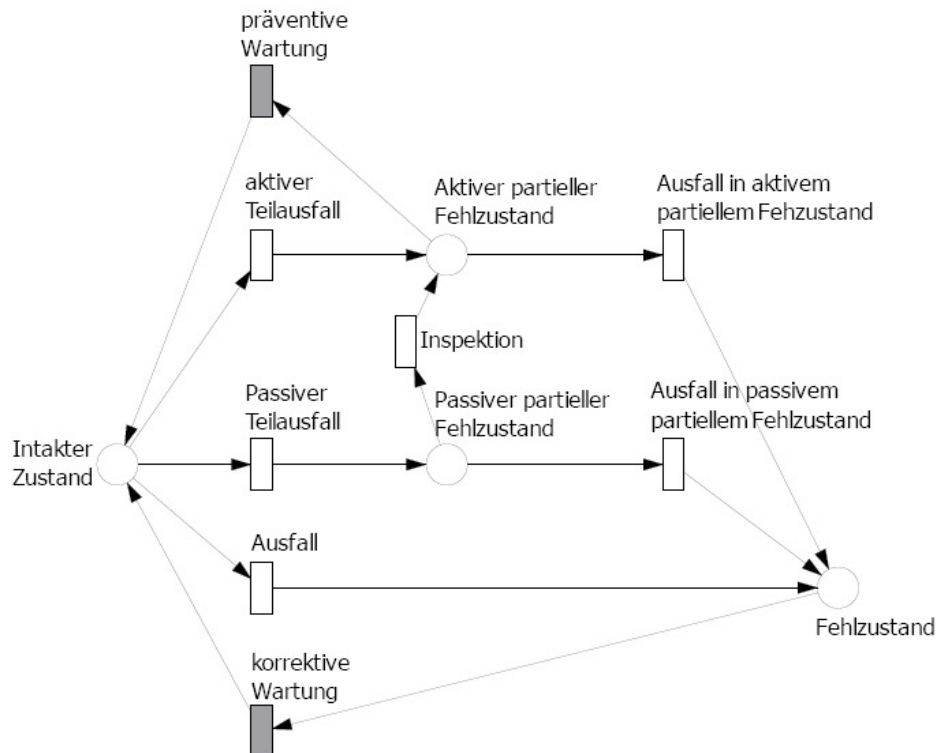


Abbildung 1: Generisches Zuverlässigkeitsmodell der Systemelemente

In diesem Beitrag wird eine Modellierungs- und Optimierungsmethode für die Instandhaltungsprozesse von Eisenbahninfrastrukturen präsentiert. Bei der Methode

werden für die Systemmodellierung Petrinetze eingesetzt. Abbildung 1 zeigt das generische Modell der Zuverlässigkeit von Infrastrukturelementen. Dieses beinhaltet vier verschiedene Zuverlässigkeitszustände:

- *Intakter Zustand*: Einwandfreier Zustand, volle Verfügbarkeit des Elements.
- *Partieller Fehlzustand*: In diesem Zustand ist der normale Eisenbahnbetrieb nicht behindert. Partielle Fehler werden durch präventive Wartung repariert. Dieser Zustand lässt sich weiter unterteilen in
 - *Aktiver partieller Fehlzustand*, bei dem der Fehler an die Überwachungszentrale gemeldet wird.
 - *Passiver partieller Fehlzustand*, bei dem der Fehler unentdeckt bleibt, bis die präventive Wartungsrotte den Sektor besucht oder ein Messwagen ihn durch Inspektion aufdeckt.
- *Fehlzustand*: In diesem Zustand behindert das Element den Eisenbahnbetrieb und verursacht Systemunverfügbarkeit. Ein Fehlzustand wird (durch den Betrieb) entdeckt und kann durch die korrektive Wartungsrotte repariert werden.

Die Transitionen *Ausfall*, *Aktiver* sowie *Passiver Teilausfall* und *Ausfall in aktivem* und *passivem Zustand* unterliegen der negativen Exponentialverteilung. In der Realität sind die Ausfallraten vom Alter abhängig, sowohl bei mechanischen als auch bei elektronischen Elementen. Die Ausfallrate nimmt im Laufe der Zeit zu und folgt im Allgemeinen den Weibull Gesetz. Die in dieser Studie eingesetzten Ausfallraten beruhen auf der statistischen Datenerfassung der SNCF seit Anfang des TGV Betriebs. Die Optimierung der Instandhaltungsstrategie wird mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt.

Die Methode wird anhand einer Fallstudie mit realen Daten einer französischen Hochgeschwindigkeitsstrecke validiert.

Literatur:

- [1] [Veit 2007] Veit, P. (2007). *Instandhaltung und Anlagenmanagement*, Handbuch Eisenbahninfrastruktur, S. 873-925. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- [2] Antoni, M., 2008. Reduction of the intervention time on a high speed line - Towards an optimisation of the maintenance organisation. *WCRR08*.
- [3] [Meier-Hirmer 2007] Meier-Hirmer, C. (2007). *Modèles et techniques probabilistes pour l'optimisation des stratégies de maintenance. Application au domaine ferroviaire*. Dissertation, Université de Marne-la-Vallée.
- [4] [Quiroga 2008] Quiroga, L., Slovak, R., Wegele, S., und Antoni, M. (2008). *Petri net based simulation and optimisation of railway maintenance processes*. In: Tarnai, G.; Schnieder, E., Hrsg.: *Formal Methods for Railway Operation and Safety in Railway and Automotive Systems, Symposium (FORMS) 2008*, S. 173-183. L'Harmattan, Budapest.

Robuste Verkehrszustandsschätzung und Störungserkennung im Verkehrsfluss auf Schnellstraßen

Martin Schober *

* Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
Telefon: 0711-9459048
Fax: 0711-68566371

E-Mail: schober@isys.uni-stuttgart.de

Herbert Wehlan **

** Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
Telefon: 0711-68566304
Fax: 0711-68566371

E-Mail: wehlan@isys.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Verkehrszustandsschätzung, Parameterschätzung, Constrained Extended Kalman Filter, Innovationsbasierte Fehlererkennung

Aufgrund des stetig ansteigenden Verkehrsaufkommens ist es notwendig die vorhandenen Kapazitäten des Straßennetzes durch den Einsatz von Verkehrsinformations- und -leitsystemen zu erhöhen. Diese Systeme benötigen aber für einen optimalen Betrieb schnelle, hochwertige und zuverlässige Informationen über den aktuellen Verkehrszustand. Zur Generierung entsprechender Verkehrsinformationen existieren bereits viele verschiedene Verfahren, die für die von ihnen auszuführenden Aufgaben aktuelle Verkehrsdaten hauptsächlich von ortsfesten Messstellen verwenden. Die Leistungsfähigkeit dieser Verfahren und die Qualität der von ihnen erzeugten Verkehrsinformationen werden aber vornehmlich von zwei Faktoren beeinflusst: ihrer Anpassung an die Topologie der zu untersuchenden Streckenabschnitte und der Qualität der verwendeten Verkehrsdaten.

AZTEK (**A**utomatische **z**eitlich-räumliche **S**törung**e**rkennung) ist ein solches Verfahren, welches mittels eines makroskopischen Verkehrsflussmodells [1] und eines Erweiterten Kalman-Filters den momentanen Verkehrszustand auf Schnellstraßen schätzt und dabei automatisch und frühzeitig Störungen im Verkehrsfluss erkennt. Die dafür benötigten Verkehrsdaten sind üblicherweise makroskopische Kenngrößen wie mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsfluss, die lokal z.B. durch Induktionsschleifendetektoren gemessen werden. Die von AZTEK generierten Analysedaten enthalten sowohl binäre Aussagen, ob in einem untersuchten Streckenabschnitt eine Verkehrsstörung vorliegt, als auch eine Verkehrszustandsschätzung in Form von Geschwindigkeits- und Dichteprofilen entlang des Streckenabschnitts. Mit der binären Entscheidung, ob eine Störung vorliegt, wird eine frühzeitige Störungsdetektion angestrebt, welche im Fall einer Störung anschließend durch die Verkehrszustandsschätzung räumlich genau eingegrenzt wird.

In diesem Beitrag werden neben den Grundzügen von AZTEK speziell einige Weiterentwicklungen an AZTEK erläutert, die zu einer Erhöhung der Qualität der generierten Verkehrsinformationen führen und vor allem einen robusten Einsatz von AZTEK in der praktischen Anwendung ermöglichen, insbesondere unter der Einwirkung der beiden oben genannten Einflüsse [4].

Die Anpassung an die Topologie der zu überwachenden Streckenabschnitte umfasst zwei Erweiterungen. Zum einen werden wichtige Modellparameter mithilfe einer On-

line-Parameterschätzung automatisiert angepasst, um die Einflüsse von Topologieeigenschaften wie z.B. Steigungen und Kurvigkeit auf den Verkehrsfluss berücksichtigen zu können. Zum anderen wird eine dynamische Kompensation des in Streckenabschnitten mit Anschlussstellen ohne Messstellen eingetragenen Fahrzeugbilanzfehlers durch eine Schätzung des Flusses über die Ein-/Ausfahrten angestrebt. Eine ausführliche Beobachtbarkeits- und Sensitivitätsanalyse zeigt, wie viele dieser Größen gleichzeitig und wann sie sinnvollerweise mitzuschätzen sind, da aufgrund der limitierten Anzahl an Messgrößen nicht beliebig viele Parameter gleichzeitig zur Zustandsschätzung herangezogen werden können.

Um die Auswirkungen des zweiten Einflussfaktors, der Qualität der Verkehrsdaten, gering zu halten, werden einerseits die Verkehrszustandsschätzung, andererseits die automatische Störungserkennung in Richtung Robustheit erweitert. Bei der Verkehrszustandsschätzung werden hierzu Beschränkungen mithilfe eines dafür entwickelten Constrained Extended Kalman Filter (CEKF) in die Schätzaufgabe eingebunden [3]. Die Beschränkungen umfassen einfache Zustandsbeschränkungen, Dynamikbeschränkungen sowie Beschränkungen des Verkehrsflusses, welche aus der Verkehrsflusstheorie abgeleitet werden. Das CEKF verwendet sowohl die Methode der Lagrange-Multiplikatoren als auch ein Bestrafungsfunktional, um eine hochwertige Verkehrszustandsschätzung, trotz fehlerbehafteter Verkehrsdaten und daraus resultierender Fahrzeugbilanzfehler von bis zu 25%, zu gewährleisten.

Für eine frühzeitige, robuste Störungserkennung wird eine sogenannte innovationsbasierte Störungserkennung [2] anhand von Verkehrsdaten für den praktischen Einsatz ausgelegt. Sie verwendet die Innovation des Kalman-Filters, um vom Verkehrsflussmodell nicht abgedeckte Störungen wie z.B. Unfälle zu detektieren. Ihre Anfälligkeit für Fehler in der Fahrzeugbilanz wird unter Zuhilfenahme von Erweiterungen wie einem Zwei-Filterabschnitts-Ansatz und einer Hochpassfilterung deutlich verringert, wodurch sie ebenfalls eine Robustheit gegenüber fehlerbehafteten Messdaten bis zu einem Fahrzeugbilanzfehler von 25% erreicht.

Eine auf der Basis von historischen Daten durchgeführte qualitative wie quantitative Bewertung der Ergebnisse zeigt die positiven Auswirkungen der einzelnen Erweiterungsschritte auf die Qualität der Verkehrszustandsschätzung und der automatischen Störungserkennung. Die Tauglichkeit von AZTEK für den praktischen Einsatz wird durch die beschriebenen Maßnahmen ganz wesentlich verbessert.

Literatur:

- [1] Cremer M., *Der Verkehrsfluss auf Schnellstrassen - Modelle, Überwachung, Regelung*. Berlin - Heidelberg - New York, Springer, 1979.
- [2] Meier, J., *Modellgestützte Störungserkennung im Verkehrsfluss auf Schnellstraßen*, Dissertation, Institut für Systemdynamik (ISYS), Universität Stuttgart, 2007.
- [3] Schober, M. und Wehlan, H., *Fostering Robustness of an Automatic Highway Incident Detection Algorithm Using Constrained Estimation*, In: 7th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Genf, Schweiz, 2008.
- [4] Schober, M., *Robuste Verkehrszustandsschätzung und Störungserkennung im Verkehrsfluss auf Schnellstraßen*, Dissertation, Institut für Systemdynamik (ISYS), Universität Stuttgart, 2009.

Sensormanagement für die Füllungserfassung von modernen Verbrennungsmotoren

A. de Moll, G. Nau

S.X. Ding

Automatisierungstechnik und Komplexe Systeme
Universität Duisburg-Essen
Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg
0203-379-4287
0203-379-2928
andreas.de-moll@uni-due.de

Automatisierungstechnik und Komplexe Systeme
Universität Duisburg-Essen
Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg
0203-379-3386
0203-379-2928
steven.ding@uni-due.de

Schlüsselwörter: Motormanagement, Sensormanagement, optimale Sensorplatzierung

Aufgrund steigender, gesetzlicher Anforderungen an die Einhaltung von Abgasemissionen und die Gewährleistung eines möglichst hohen Wirkungsgrades von modernen Verbrennungsmotoren, wird ein immer komplexer werdendes Motormanagement benötigt. Dieses erfordert rechenintensive mathematische Modelle und genaue Messwerte, um thermodynamische Vorgänge im Füllungspfad des Motors präzise zu berechnen und damit eine optimale Regelung des Prozesses zu ermöglichen [1]. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sollte diese Berechnung so kostengünstig wie möglich erfolgen, was mit der Minimierung der Anzahl von Sensoren bei gleichzeitiger Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen einhergeht.

Die primäre Zielsetzung ist somit das Erreichen optimaler Performanz eines zu entwerfenden Zustandsbeobachters bei gleichzeitiger Minimierung der Sensorenkosten. Optimale Performanz bedeutet dabei eine schnellstmögliche Konvergenz beziehungsweise minimale Varianz des Schätzfehlers sowie die Robustheit des Beobachters gegen Störungen und Fehler verschiedener Art. Als sekundäre Zielsetzung ist eine gute Diagnostizierbarkeit von Aktuator-, Prozess- und Sensorfehlern wünschenswert.

Die Analyse verschiedener Sensorkonfigurationen erfolgt hinsichtlich der schnellen Verfügbarkeit einer Aussage gemäß Abbildung 1 in drei Phasen.

In der ersten Auswertungsphase (Strukturelle Verfahren zur Vorauswahl) werden rein strukturelle Systemeigenschaften gemäß [2] bzw. [3] untersucht. Diese Untersuchung dient einer Vorauswahl von möglicherweise geeigneten Sensorkonfigurationen.

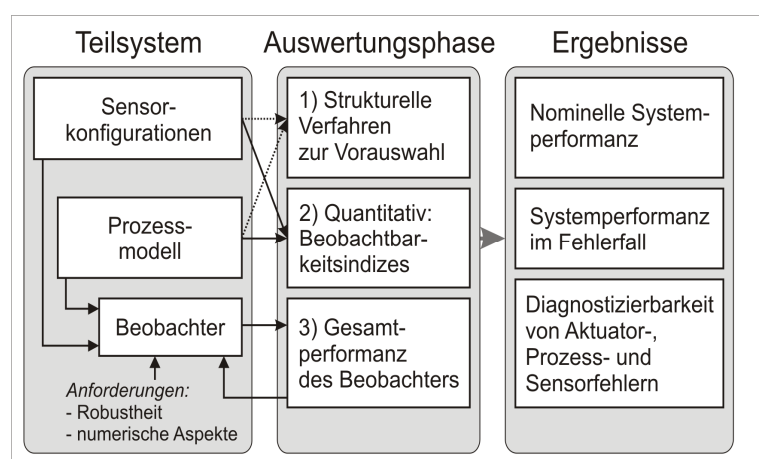


Abbildung 1: 3 Phasen Konzept

In der zweiten Auswertungsphase (Quantitativ: Beobachtbarkeitsindizes) werden die

möglicherweise geeigneten Sensorkonfigurationen (Ergebnis Stufe 1) zusammen mit dem Prozessmodell hinsichtlich der resultierenden Beobachtbarkeit untersucht. Dazu werden verschiedene Indizes als Auswertekriterien benutzt, wie sie z.B. in [4] oder [5] beschrieben werden, die eine quantitative Bewertung der Beobachtbarkeit ermöglichen.

In der dritten Auswertungsphase (Gesamtperformanz des Beobachters) wird ein Beobachter, basierend auf linearer Theorie in Kombination mit arbeitspunkt-abhängigem Gain - Scheduling, für die aus der zweiten Phase als gut befundenen Sensorkonfigurationen einerseits ausgelegt und andererseits bewertet. Bei der Auslegung der Beobachterrückführungen finden

- die Anforderungen an die Robustheit bei Modellungenauigkeiten,
- Störeinflüsse durch numerische Implementierung sowie
- Sensoreigenschaften

eine Berücksichtigung. Die Bewertung stellt die einzelnen Sensorkonzepte mit den optimierten Beobachterrückführungen gegenüber und schafft somit eine Aussage zu jeder Sensorkonfiguration hinsichtlich der geforderten Eigenschaften.

Die Ergebnisse der drei Auswertungsstufen erlauben eine konkrete Aussage über die Systemperformanz im fehlerfreien- und fehlerbehafteten Fall sowie eine Aussage über die Diagnostizierbarkeit von Prozessfehlern.

Literatur:

- [1] N. Weinhold: Einbettung modellgestützter Fehlerdiagnose in Regelungssysteme und deren Anwendung für die On-Board Diagnose in Fahrzeugen, Dissertation der Universität Duisburg-Essen, 2007
- [2] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki: Diagnosis and Fault-Tolerant Control, Second Edition, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [3] P. Andersson, E. Frisk, L. Eriksson: Sensor Selection for Observer Feedback in Turbocharged Spark Ignited Engines, IFAC 2005
- [4] E. Frisk, M. Krysander, J. Åslund: Sensor placement for fault isolation in linear differential-algebraic systems, Automatica 45 pp.364-371, 2009
- [5] P. Cotae, S. Yalamnchili, C. L. P. Chen, and A. Ayon: Optimization of Sensor Locations and Sensitivity Analysis for Engine Health Monitoring Using Minimum Interference Algorithms, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Volume 2008, Article ID 280346

Online-Schätzung der Kupplungskennlinien eines Doppelkupplungsgetriebes

Vortragender: Alex Tarasow

Technische Universität Clausthal

Institut für Elektrische Informationstechnik

Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, Prof. Dr.-Ing. Christian Bohn

Kurzfassung

In vielen modernen KFZ- Antriebskonzepten erfolgt die Leistungsübertragung zwischen Antriebsaggregat und Abtrieb mittels eines automatisierten Doppelkupplungsgetriebes. Dieses Konzept ermöglicht schnelle Gangwechsel ohne Zugkraftunterbrechung und erfüllt gleichzeitig die hohen Anforderungen an den Schaltkomfort. Die beiden parallel wirkenden Kupplungen übertragen proportional zur Anpresskraft zwischen den Kupplungsscheiben ein Drehmoment. Der Zusammenhang zwischen der Stellgröße der Anpresskraft und dem übertragbaren Drehmoment kann in Form einer Kennlinie (Kupplungskennlinie) beschrieben werden. Für eine optimale Steuerung der zu übertragenden Antriebsleistung ist es erforderlich, die Kupplungskennlinie möglichst genau zu kennen.

Im aktuellen Entwicklungsstand wird die Kupplungskennlinie im Rahmen der Inbetriebnahme im Steuergerät gelernt und während des Betriebs über ein Adaptionverfahren korrigiert (s. z.B. [1]). Diese Adaption erfolgt anhand mehrerer charakteristischen Messpunkte der Drehmomentübertragung, wodurch in erster Linie langfristige Änderungen der Kennlinie erfasst werden können.

Der in diesem Vortrag vorgestellte Ansatz zielt darauf ab, Parameterschätzverfahren einzusetzen, mit denen auch dynamische Änderungen der Kupplungskennlinie erfasst werden können. Hierfür werden verschiedene Verfahren der Online-Systemidentifikation untersucht (das einfachste Verfahren der Parameterschätzung über Zustandserweiterung und -schätzung [2] sowie die komplexere Schätzung über adaptive Filterung nach dem rekursiven Prädiktionsfehlerverfahren [3, 4]). Im ersten Schritt erfolgt die Implementierung und Untersuchung der Verfahren zur Kennlinienschätzung in der Simulation. Dabei wird die grundsätzliche Eignung der verschiedenen Identifikationsmethoden beurteilt. Die Verfahren werden einander gegenübergestellt und in Bezug auf Erwartungstreue und Identifikationsdynamik bewertet. Im nächsten Schritt erfolgt eine Erprobung der Schätzverfahren anhand von Fahrzeugmessdaten. Die Ergebnisse belegen die grundsätzliche Einsetzbarkeit solcher Verfahren, wobei sich zeigt, dass das einfache Verfahren der Zustandserweiterung aufgrund der fehlenden Erwartungstreue [5] hier nicht eingesetzt werden kann und auf komplexere Verfahren zurückgegriffen werden muss.

[1] Eich, J. 2007. Verfahren zur Steuerung einer automatisierten Kupplung. *Patent-Nr.: DE102007006799A1*

[2] Cox, H. 1964. On the estimation of state variables and parameters for noisy dynamic systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 9:5-12.

[3] Ljung, L. und T. Söderström. 1983. *Theory and Practice of Recursive Identification*. Cambridge: MIT Press.

[4] Ljungquist, D. und J. G. Balchen. 1994. Recursive prediction error methods for online estimation in nonlinear state-space-models. *Modeling, Identification and Control* 15:109-21.

[5] Ljung, L. 1979. Asymptotic behavior of the extended Kalman filter as a parameter estimator for linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 24:36-50.

Nichtlineare \mathcal{H}_∞ -Regelung für nichtlineare zeitvariante Systeme – iISS-Stabilitätsanalyse

Bernd Schmidt

TU Ilmenau

Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik

Fachgebiet Regelungstechnik

Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau

Tel.: 03677/69-2867

E-Mail: bernd-hans.schmidt@tu-ilmenau.de

Schlüsselwörter: nichtlineare \mathcal{H}_∞ -Regelung, integral Input-to-State Stability, zeitvariante Systeme, bilineare Systeme

Der zeitinvariante Fall der nichtlinearen \mathcal{H}_∞ -Regelung ist schon lange behandelt worden, u. a. in den Arbeiten von Isidori et al. [1], [2] und van der Schaft [3], [4], wobei bei letzterem eine Zusammenfassung in dem bekannten Buch [5] gefunden werden kann. Die dabei verwendeten Stabilitätsaussagen stützen sich auf das Invarianzprinzip von Krasovskii-LaSalle bzw. Systemeigenschaften wie Nullzustandsbeobachtbarkeit und -detektierbarkeit. In Angeli et al. [6] wurde das iISS-Konzept (integral Input-to-State Stability) von Sontag [7] verwendet und Äquivalenzen zu ähnlichen Bedingungen wie in Isidori et al. und van der Schaft aufgezeigt.

Die iISS-Theorie ist ursprünglich ein verallgemeinertes Stabilitätskonzept für *zeitinvariante* nichtlineare Systeme vom Typ $\dot{x} = f(x, u)$. Sie liefert eine Aussage über die Beziehung zwischen Eingängen und Zuständen der Art \mathcal{L}_2 nach \mathcal{L}_∞ . Zur praktischen Stabilitätsuntersuchung verwendet man iISS-Lyapunovfunktionen $V(x)$, die u.a.

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x, u) \leq -\nu(\|x\|) + \Delta(\|u\|), \quad \forall t \geq 0, x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m \quad (1)$$

$\Delta \in \mathcal{K}_\infty$, ν positiv definit, $\|\cdot\|$ Euklidische Norm, erfüllen. Für den Fall $u \equiv 0$ erhält man dann die Lyapunovbedingung, wie man sie für Systeme $\dot{x} = f(x)$ kennt. Gleichung (1) kann dann als dissipative Formulierung der iISS-Theorie verstanden werden. Da \mathcal{H}_∞ -Regelung und Dissipativität stark miteinander verknüpft sind, ist es daher naheliegend, eine geeignete iISS-Theorie auch im Fall von zeitvarianten Systemen, wo das Invarianzprinzip von Krasovskii-LaSalle nicht mehr gilt, anzuwenden.

Dieser Vortrag behandelt die \mathcal{H}_∞ -Regelung von *zeitvarianten* nichtlinearen Systemen mit besonderem Fokus auf den Fall bilinearer Systeme. Das \mathcal{H}_∞ -Problem wird zunächst für nichtlineare Systeme formuliert, die affin im Eingang sowie affin in der Störung sind. Auf dieser Grundlage wird ein suboptimales Regelgesetz berechnet. Für den Fall mit Störungen wird dann anhand der zeitvarianten iISS-Theorie [8], [9], eine Stabilitätsaussage getroffen. Soll für zeitinvariante bilineare Systeme eine Folgeregelung entworfen werden, so wird das Fehlersystem im allgemeinen zeitvariant. Dieses Fehlersystem weist dann eine besondere Struktur auf [10]. Berücksichtigt man diesen Spezialfall bei der Stabilitätsbetrachtung, so kann eine konkrete Aussage getroffen werden, wann im geschlossenen Regelkreis Stabilität vorliegt.

Literatur

- [1] A. Isidori, "Dissipation inequalities in nonlinear H_∞ -control," in *Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 1992, pp. 3265–3270.
- [2] A. Isidori and A. Astolfi, "Disturbance attenuation and H_∞ -control via measurement feedback in nonlinear control systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 9, pp. 1283–1293, 1992.
- [3] A. J. van der Schaft, "On a state-space approach to nonlinear H_∞ -control," *Systems and Control Letters*, vol. 16, pp. 1–8, 1991.
- [4] ———, " L_2 -gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state feedback H_∞ -control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 6, pp. 770–784, 1992.
- [5] A. van der Schaft, *L_2 -Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*. London: Springer, 1996.
- [6] D. Angeli, E. D. Sontag, and Y. Wang, "A characterization of integral input-to-state stability," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 6, pp. 1082–1097, 2000.
- [7] E. D. Sontag, "Comments on integral variants of ISS," *Systems Control Lett.*, vol. 34, no. 1-2, pp. 93–100, 1998.
- [8] M. Malisoff and F. Mazenc, "Further remarks on strict input-to-state stable Lyapunov functions for time-varying systems," *Automatica*, vol. 41, pp. 1973–1978, 2005.
- [9] F. Mazenc, M. Malisoff, and M. S. de Queiroz, "Further results on strict Lyapunov functions for rapidly time-varying nonlinear systems," *Automatica*, vol. 42, pp. 1663–1671, 2006.
- [10] B. Schmidt and J. Reger, " H_∞ suboptimal tracking control with integral action and load estimation applied on a boost-converter/dc-motor combination," in *Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications*, St. Petersburg, Russia, 2009, pp. 147–152.

Transparente Parametrierung der nichtlinearen Zustandsregelung mit IDA-PBC

Paul Kotyczka *

* Lehrstuhl für Regelungstechnik
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching
Telefon: 089/289-15687
Fax: 089/289-15653
kotyczka@tum.de

Boris Lohmann **

** Lehrstuhl für Regelungstechnik
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching
Telefon: 089/289-15662
Fax: 089/289-15653
lohmann@tum.de

Schlüsselwörter: Nichtlineare Regelung, Passivität, Reglerparametrierung.

In den vergangenen 30 Jahren wurden energie- und passivitätsbasierte Regelungsverfahren für immer weitere Klassen nichtlinearer Systeme entwickelt. Eine wichtige Frage ist, wann sich Systeme durch Zustandsrückführung in passive Systeme überführen lassen [1]. Vor etwa 10 Jahren wurde mit *Interconnection and Damping Assignment Passivity Based Control* [2] (IDA-PBC) eine Methode vorgestellt, mit der für viele Systemklassen mit größtmöglicher Entwurfsfreiheit nichtlineare Zustandsregelungen entworfen werden können. IDA-PBC basiert auf der *Port-Hamiltonschen* Darstellung des geregelten Systems [3].

Über die Schritte *Energy Shaping* und *Damping Injection* wird in *physikalisch motivierter* Weise zunächst die (virtuelle) *Energie* für das geregelte System so geformt, dass sich ein Minimum in der gewünschten Ruhelage ergibt. Danach wird über die Rückführung eines passiven Ausgangs künstliche Dämpfung eingefügt und damit für asymptotische Stabilität und günstiges Übergangsverhalten gesorgt. Anfängliche Entwurfparameter sind die *Struktur- und Dämpfungsmatrix*, die systeminternen Energieaustausch und Dissipation darstellen.

Um dem Entwerfer eine transparentere Wahl der Entwurfparameter hinsichtlich des erzielbaren dynamischen Verhaltens zu ermöglichen, wird in diesem Beitrag eine Methode zur *Zuweisung lokal linearer Dynamik* [4] vorgestellt. Das lokale Wunschverhalten des geregelten Systems (also die Linearisierung um die gewünschte Ruhelage) wird dazu über ein lineares Vergleichssystem vorgegeben. Eine Zustandstransformation bringt die Restriktionsgleichungen (ein Satz partieller Differentialgleichungen, der die unter Zustandsrückführung invariante Dynamik beschreibt) in eine Normalform. In den neuen (Normal-)Koordinaten lässt sich sowohl die Hessematrix der Energiefunktion des geregelten Systems bei gewünschter lokal linearer Dynamik direkt angeben, als auch daraus ein (in der Regel unterbestimmtes) *lineares Gleichungssystem* für die dazu erforderlichen IDA-PBC-Entwurfparameter ableiten. Liefert das lineare Gleichungssystem für asymptotisch stabil vorgegebene Wunschdynamik eine positiv semidefinite Dämpfungsmatrix, so ist auch gesichert, dass die Hessematrix der Energie in der Ruhelage positiv definit ist. Damit entfällt die sonst notwendige Definitheitsprüfung der Hessematrix.

Das zunächst auf konstante Entwurfparameter in Struktur- und Dämpfungsmatrix beschränkte Vorgehen kann bei geschickter Faktorisierung auch auf zustandsabhängige und zeitvariante Entwurfsmatrizen übertragen werden, wobei den dabei entstehenden Schwierigkeiten Rechnung zu tragen ist.

Weiterhin wird in diesem Beitrag die Anwendung der entwickelten Methode anhand zweier Laborexperimente demonstriert. Am Beispiel der Festwert- und Folgeregelung [5] für die „Schwebende Kugel“ werden die Entwurfsschritte gezeigt. Der Laborversuch „Kippende Laufmaschine“ illustriert, wie Kernpunkte des Vorgehens auf unteraktuierte mechanische Systeme übertragen werden können.

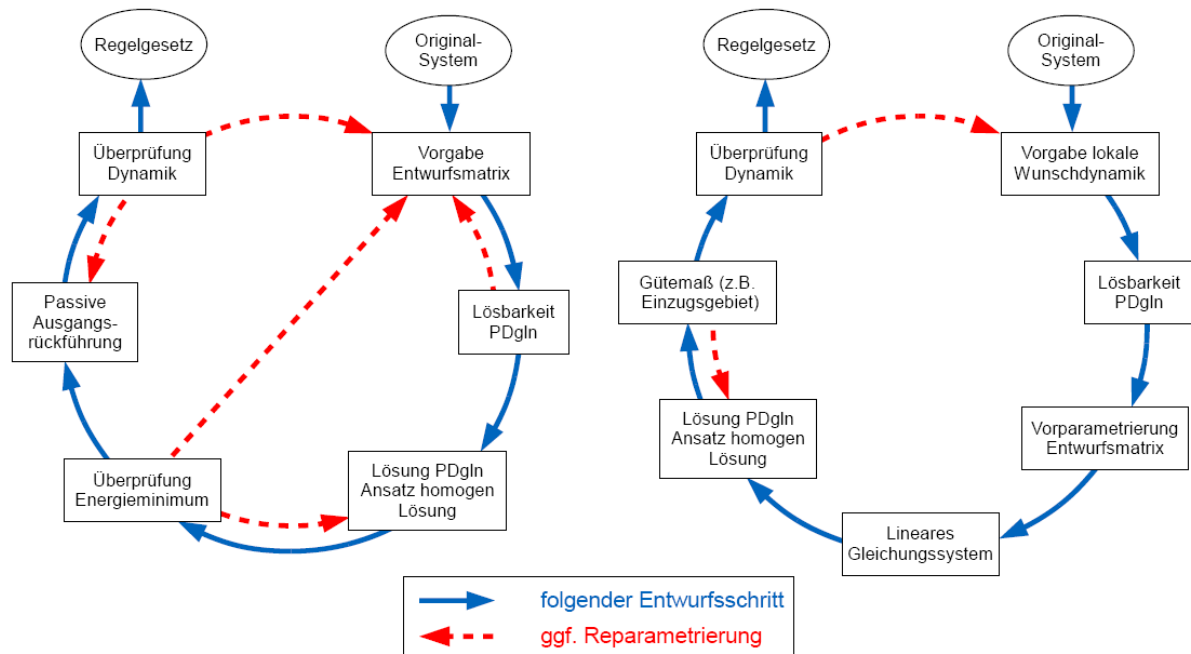


Abbildung 1: Gegenüberstellung der Entwurfsschritte beim „klassischen“ (links) und beim vorgestellten Ansatz zur Parametrierung von IDA-PBC

Literatur:

- [1] C. I. Byrnes, A. Isidori, J. C. Willems: Passivity, Feedback Equivalence, and the Global Stabilization of Minimum Phase Nonlinear Systems. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1991, 36, S. 1228-1240.
- [2] R. Ortega, A. J. van der Schaft, I. Mareels, B. Maschke: Putting Energy Back in Control. *IEEE Control Syst. Mag.*, 2001, 21, S. 18-33.
- [3] A. J. van der Schaft: *L₂-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*. Springer-Verlag, London, 2000.
- [4] P. Kotyczka, B. Lohmann: Parametrierung von IDA-PBC über Zuweisung lokal linearer Dynamik. Erscheint in *at – Automatisierungstechnik*.
- [5] P. Kotyczka, A. Volf, B. Lohmann: Passivity Based Trajectory Tracking Control with Predefined Local Linear Error Dynamics. Eingereicht zur ACC 2010.

Sliding-Mode Regelung eines unteraktuierten Manipulators

Carsten Knoll und Klaus Röbenack

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Technische Universität Dresden

01062 Dresden

Telefon: 0351-463-33940

Fax: 0351-463-37281

Email: {carsten.knoll,klaus.roebenack}@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Gleitregime, unteraktuiert, nicht-holonom

Untersucht wird ein zweigliedriger Manipulator in der horizontalen Ebene. Im Unterschied zu den bisher bei Handhabungsprozessen üblichen Manipulatoren besitzt der in Abbildung 1 skizzierte Aufbau nur im ersten Gelenk einen Antrieb. Das zweite Gelenk lässt sich lediglich indirekt über die Trägheitskopplung beeinflussen. Die Anzahl der Stelleingriffe ist damit kleiner als die Zahl der mechanischen Freiheitsgrade, d.h. das System ist unteraktuiert. Der nicht aktuierte Teil der Bewegungsgleichungen lässt sich auch als nicht-integrierbare Nebenbedingung des Starrkörpermodells auffassen. Daher spricht man mitunter auch von nicht-holonomen Systemen.

Unteraktuierte Systeme sind regelungstechnisch oft außerordentlich schwierig zu behandeln. In der Regel sind die in der Robotik etablierten Regelungsverfahren nicht anwendbar. So besitzt beispielsweise das betrachtete Manipulatorsystem durch den fehlenden Einfluss der Schwerkraft ein zweidimensionales Kontinuum von Ruhelagen, wo zudem die Linearisierung nicht steuerbar ist. Auch bei Einbeziehung der nichtlinearen Dynamik ist das System nicht durch eine stetige Zustandsrückführung stabilisierbar, da die Brockett-Bedingung verletzt ist [1].

Die Regelungsaufgabe besteht in der Überführung des unteraktuierten Manipulators von einer Startposition in eine Endlage. Zu diesem Problem wurden in den letzten zwei Jahrzehnten zahlreiche Fachbeiträge veröffentlicht, siehe Übersicht in [2,3]. Eine Klasse von Lösungsverfahren beruht auf technischen bzw. konstruktiven Ansätzen, beispielsweise dem Einbau einer Bremse im passiven Gelenk [4], der Annahme sehr starker Haftreibung [5] oder einer Neigung der Manipulatorebene [6]. Eine zweite Klasse von Lösungsverfahren verzichtet auf derartige konstruktionsbedingten Besonderheiten, ist dafür aber theoretisch oder numerisch sehr aufwendig. Die Regelungsaufgabe kann beispielsweise auf der Basis differentialgeometrischer Konzepte [3,7] oder durch periodische bzw. chaotische Anregung [8,9] erfüllt werden. Die daraus resultierenden Bewegungsabläufe sind oft langwierig oder erfordern eine hohe Aktivität des Stellgliedes. Die Bewegungssteuerung ist auch mittels numerischer Optimierung [10] möglich, wobei allerdings Konvergenzprobleme bei speziellen Anfangswerten nicht auszuschließen sind.

Zahlreiche in der Literatur vorgestellte Verfahren führen zunächst eine partielle Linearisierung mittels Rückführung durch und erhalten damit deutlich vereinfachte Modellgleichungen. Je nach Annahme zur Reibung erhält man aber eine instabile

bzw. nicht asymptotisch stabile interne Dynamik. Die wesentliche Idee der hier entwickelten Vorgehensweise besteht darin, den 4-dimensionalen Zustandsraum auf eine geeignete Untermannigfaltigkeit zu projizieren. Auf dieser Untermannigfaltigkeit erhält man eine reduzierte Dynamik, welche anschließend mit einem Sliding-Mode Regler stabilisiert wird. Durch eine geeignete Parametrierung der Gleitfläche ist man in der Lage, auch die zur Projektion komplementären Zustandskoordinaten gezielt zu beeinflussen.

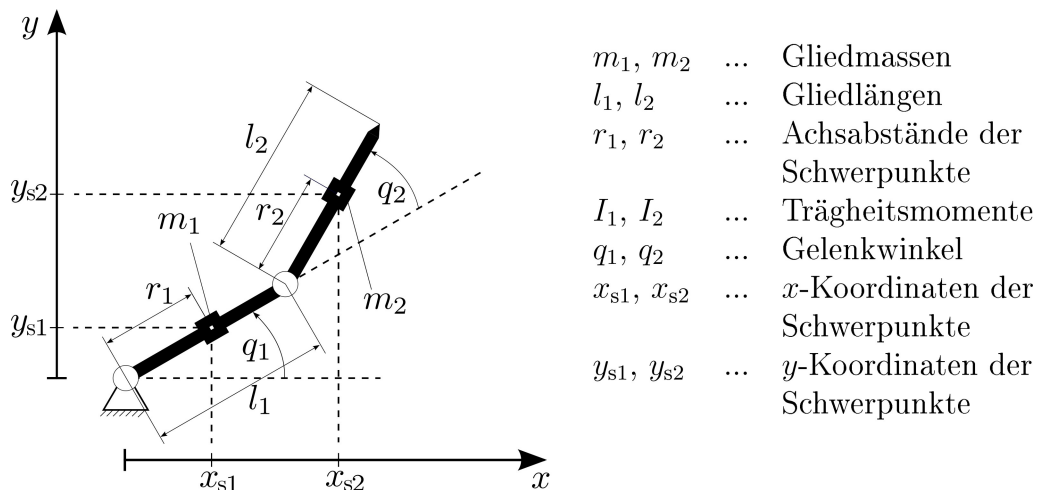


Abbildung 1: Schematische Darstellung des zweigliedrigen Manipulators

Literatur:

- [1] R. W. Brockett: *Asymptotic Stability and Feedback Stabilization*. In R.W. Brockett, R.S. Millmann, H. J. Sussmann (Hrsg.): *Differential Geometric Control Theory*. Birkhäuser, 1983.
- [2] M. W. Spong: *Underactuated Mechanical Systems*. In B. Siciliano, K. P. Valavanis: *Control Problems in Robotics*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, Band 230, Springer, 1998.
- [3] F. Bullo, A. D. Lewis: *Geometric Control of Mechanical Systems: Modelling, Analysis and Design for Simple Mechanical Control Systems*. Springer, 2005.
- [4] H. Arai and S. Tachi: *Position Control of a Two Degree of Freedom Manipulator with Passive Joint*. IEEE Transactions on Industrial Electronics 38 (1991) 1, S. 15-20.
- [5] A. D. Mahindrakar, S. Rao, R. N. Banavar: *Point-to-Point control of a 2R planar horizontal underactuated manipulator*. Mechanism and Machine Theory 41 (2006), S. 838-844.
- [6] J. Mareczek, M. Buss, G. Schmidt: *Robuste Regelung eines nicht-holonomen, unteraktuierten SCARA Roboters*. Automatisierungstechnik 47 (1999) 5, S. 199-208.
- [7] A. De Luca, R. Mattone, G. Oriolo: *Stabilization of Underactuated Robots: Theory and Experiments for a Planar 2R Manipulator*. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, 1997, S. 3274-3280.
- [8] T. Suzuki, M. Koinuma, Y. Nakamura: *Chaos and Nonlinear Control of a nonholonomic Free-Joint Manipulator*. In: *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1996, S. 2668-2675.
- [9] K.-S. Hong, K.-R. Lee, K.-I. Lee: *Vibrational Control of Underactuated Mechanical Systems: Control Design Through Averaging Analysis*. Journal of Mechanical Science and Technology 13 (1999) 1, S. 1-10.
- [10] N. Scherm, B. Heimann: *Nichtlineare zeitdiskrete Regelung eines unteraktuierten Manipulators*. Automatisierungstechnik 49 (2001) 3, S. 107-114.

Modellierung und Regelung von HF-Systemen in Schwerionensynchrotrons

Dieter Lens *

* Regelungstheorie und Robotik/IAT
TU Darmstadt
Landgraf-Georg-Straße 4
64283 Darmstadt
Tel.: (06151) 16 4288
Fax: (06151) 16 2507
dlens@rtr.tu-darmstadt.de

Jürgen Adamy **

** Regelungstheorie und Robotik/IAT
TU Darmstadt
Landgraf-Georg-Straße 4
64283 Darmstadt
Tel.: (06151) 16 3442
Fax: (06151) 16 2507
adamy@rtr.tu-darmstadt.de

Harald Klingbeil ***

*** GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH
Planckstraße 1
64291 Darmstadt
Tel.: (06159) 71 2086
Fax: (06159) 71 2935
H.Klingbeil@gsi.de

Schlüsselwörter: Teilchenbeschleuniger, Schwingungsmoden, Stabilisierung, longitudinale Strahldynamik

Das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung betreibt eine weltweit einmalige Beschleunigeranlage für Ionenstrahlen [1]. Das Forschungsprogramm umfasst ein Spektrum, das von Kern- und Atomphysik über die Plasma- und Materialforschung bis hin zur Tumorthherapie reicht. Bis 2014 entsteht auf dem Gelände der GSI ein neues Beschleunigerzentrum mit dem Namen FAIR [2]. Geplant ist ein neuer Doppelring vom Typ Synchrotron mit einem Umfang von rund 1100 Metern, für den die bisherige Anlage als Vorbeschleuniger dienen wird. Damit wird es möglich sein, die bisherige spezifische Energie des Teilchenstrahls von 1 GeV pro Nukleon auf bis zu 45 GeV pro Nukleon zu steigern. Die Intensität der Ionenstrahlen, d.h. die Anzahl der beschleunigten Ionen, wird mit einem Faktor von 100 zunehmen.

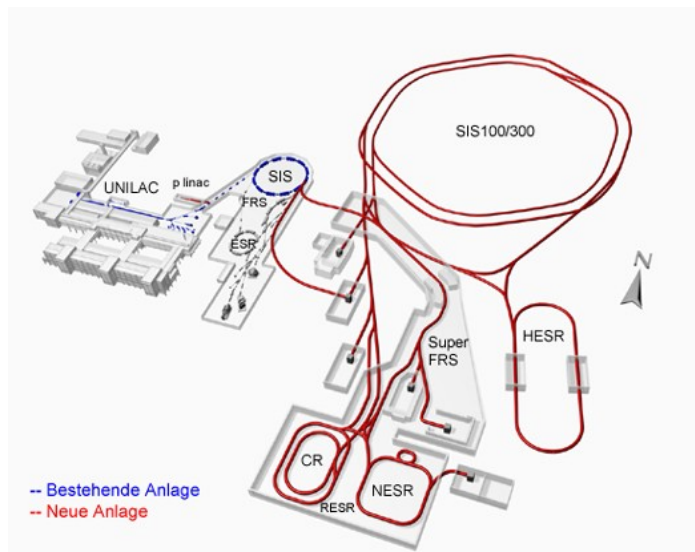


Abbildung 1: Topologie von GSI und FAIR.

Gleichzeitig steigen hierdurch die Anforderungen an die HF-Regelkreise, speziell in Bezug auf die Stabilisierung der Beschleunigungsspannung [3] und des Ionenstrahls in longitudinaler Richtung. In einem Synchrotron werden geladene Teilchen auf einer konstanten Soll-Umlaufbahn mit Hilfe einer hochfrequenten Spannung beschleunigt [4]. Durch den sinusförmigen Verlauf der Beschleunigungsspannung ist der Teilchenstrahl in longitudinaler Richtung nicht homogen verteilt, es bilden sich vielmehr Teilchenpakete (Bunche). Ein Bunch kann relativ zu anderen Bunchen im Ring oszillieren, es können aber auch kohärente Schwingungen innerhalb eines Bunches auftreten. Für beide Arten von Schwingungen existiert eine weitgehend geschlossene Theorie [5], bei der die kohärenten Bunchschwingungen in Moden zerlegt werden. Abbildung 2 zeigt die ersten vier Moden im longitudinalen Phasenraum. Der zweidimensionale Phasenraum ergibt sich dabei aus der

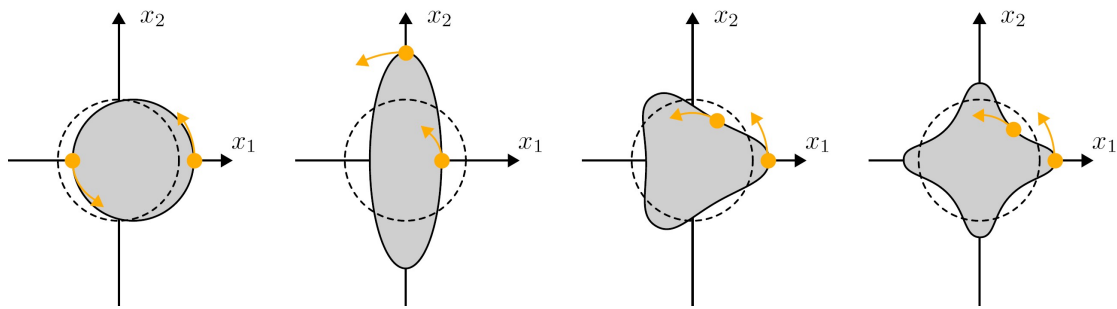


Abbildung 2: Schwingungsmoden eines Bunches im Phasenraum ($m=1,2,3,4$).

nichtlinearen Strahldynamik der Ionen. Die Moden können als Fourier-Zerlegung der Bunch-Kontur aufgefasst werden; sie bilden somit eine orthogonale Basis, mit deren Hilfe eine beliebige Bunchform beschrieben werden kann. Die Detektion der Moden erfolgt in der Regel über eine Spektralanalyse des Strahlstroms, d. h. der Projektion des Phasenraums auf die Abszisse. Die Dämpfung der longitudinalen Moden spielt eine entscheidende Rolle, um Strahlverluste zu vermeiden und die Qualität des Ionenstrahls zu erhalten. Eine Regelung der ersten beiden Moden $m=1,2$ wurde bereits experimentell bestätigt [6]. Allerdings fehlen bislang geeignete Modellansätze für eine Reglersynthese für die höheren Moden.

In diesem Beitrag wird ein neuer Ansatz zur Modellbildung und Regelung der beiden wichtigsten Moden $m=1$ und $m=2$ vorgestellt. In [7] wurde ein lineares MIMO-Modell mit Hilfe von Momenten aufgestellt. Eine Verallgemeinerung führt auf ein bilineares MIMO-Modell, in dem die Verkopplung der Moden sichtbar wird [8]. Im Vortrag wird dann gezeigt, dass zwischen Modell- und Messgrößen eine algebraische Beziehung hergeleitet werden kann und somit ein Beobachterentwurf möglich ist. Abschließend wird verdeutlicht, dass die Moden mit $m>2$ sich von den ersten beiden Moden qualitativ unterscheiden, da sie für kleine Bunche nicht mit den vorhandenen Stellgrößen stabilisiert werden können.

Literatur:

- [1] GSI Homepage: www.gsi.de.
- [2] Gutbrod H. H., Augustin I., Eickhoff H., Groß K.-D., Henning, W. F., Krämer D., Walter G. (Hrsg.): FAIR Baseline Technical Report, September 2006.
- [3] Lens D., Klingbeil H., Hülsmann P.: Beam Loading Effects on the RF Control Loops of a Double-Harmonic Cavity System for FAIR. In: Proc. 23rd IEEE Particle Accelerator Conference, Vancouver, Mai 2009.
- [4] Lee S. Y.: Accelerator Physics. Singapore: World Scientific, 1999.
- [5] Sacherer F. J.: A Longitudinal Stability Criterion for Bunched Beams. IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 20, No. 3, Juni 1973, pp. 825-829.
- [6] Klingbeil H., Zipfel B., Kumm M., Moritz P.: A Digital Beam-Phase Control System for Heavy-Ion Synchrotrons. IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 54, No. 6, Dezember 2007, pp. 2604-2610.
- [7] Lens D.: Regelungstechnische Analyse verschiedener HF-/Strahlmanipulations-Regelkreise. GSI Workshop FAIR-HF-Regelsysteme, Darmstadt, 13.03.2008.
- [8] Klingbeil H., Lens D., Mehler M., Zipfel B.: Modeling Longitudinal Oscillations of Bunched Beams in Synchrotrons. Eingereicht bei: IEEE Transactions on Nuclear Science.

Ansätze zur Regelung in der adaptiven Optik

Thomas Ruppel *

Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
0711-685-66309
0711-685-66371

thomas.ruppel@isys.uni-stuttgart.de

Oliver Sawodny **

** Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
0711-685-66302
0711-685-66371

oliver.sawodny@isys.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Adaptive Optik, Regelung verteilt-parametrischer Systeme, Modellbasierte Vorsteuerung

Zur Leistungssteigerung hochpräziser optischer Systeme werden zunehmend elektro-mechanische und elektrische Komponenten in optische Systeme integriert. Dabei können die optischen Eigenschaften des abbildenden Systems gezielt beeinflusst und im Betrieb entstehende Abbildungsfehler in Echtzeit korrigiert werden. Solche sogenannten adaptiven optischen Systeme sind bereits seit den 60er Jahren im Bereich der Hochenergie-Strahlpropagation erforscht worden [1]. Anfang der 90er Jahre wurden die wissenschaftlichen Ergebnisse für die zivile Weiterentwicklung freigegeben. Heutzutage lassen sich bereits enorme Leistungssteigerungen durch adaptive optische Systeme in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen aufzeigen. Dazu zählen z.B. die Kompensation von atmosphärischer Turbulenz in der astronomischen adaptiven Optik, die gezielte Laserstrahlformung zur Materialbearbeitung, die Bildverbesserung in der Mikroskopie oder die Verbesserung von Messverfahren in der Ophthalmologie [2-4].

Adaptive optische Systeme bestehen in der Regel aus drei wesentlichen Komponenten: 1. einem Wellenfrontsensor, mit welchem die örtlich verteilten optischen Abbildungsfehler (Aberrationen) im System gemessen werden können, 2. einem Phasenrekonstruktor zur Bestimmung der erforderlichen Phasenkorrekturen des gemessenen Fehlers und 3. einem örtlich ausgedehnten aktiven optischen Element zur gezielten Beeinflussung der Aberrationen. Die zum Einsatz kommenden Sensoren und Aktoren zeichnen sich durch eine hohe örtliche Auflösung und sehr schnelle Dynamik aus. Im Bereich der Aktorik zeigen Untersuchungen mit verformbaren Membranspiegeln auf Basis von Schwingspulenaktoren eine sehr gute Vereinbarkeit von erreichbarer Phasenkorrektur und dynamischem Eigenverhalten.

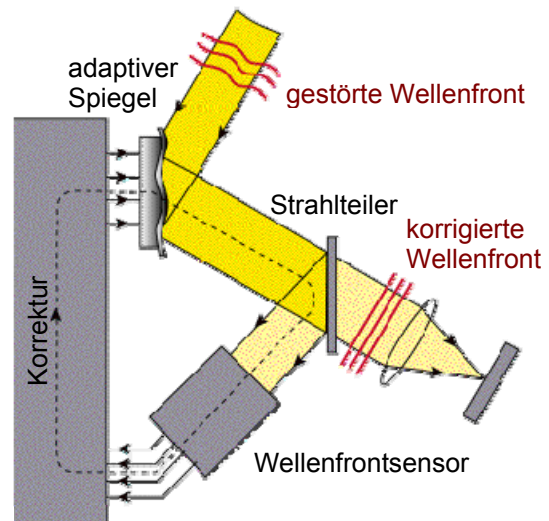


Abbildung 1: Grundprinzip adaptiver Optik

In diesem Beitrag werden systemtheoretische Grundlagen adaptiver Optik vorgestellt und Methoden zur modellbasierten Regelung monolithischer Membranspiegel mit

Schwingspulenaktoren diskutiert [5]. Einen wesentlichen Schwerpunkt bilden dabei modellbasierte Regelungskonzepte für den als verteilt-parametrisches System modellierten Membranspiegel. Die Anwendbarkeit von flachheitsbasierten Verfahren wird ebenso diskutiert wie die praktische Realisierbarkeit modaler Regelungskonzepte auf Basis verschiedener Eigenfunktionen des optischen Systems [6]. Anhand von Messdaten an einem Prototyp eines verformbaren Spiegels werden optische Effekte der Eigendynamik aufgezeigt und robuste Regelungskonzepte zur Fehlerkorrektur vorgeschlagen.

Literatur:

- [1] Babcock, H. W.: *The Possibility of Compensating Astronomical Seeing* In: Publications of the Astronomical Society of the Pacific , Vol. 65 , October (1953) , S. 229-+ .
- [2] Brusa, G.; Riccardi, A.; Salinari, P.; Wildi, F. P.; Lloyd-Hart, M.; Martin, H. M.; Allen, R.; Fisher, D.; Miller, D. L.; Biasi, R.; Gallieni, D. & Zocchi, F.: *MMT adaptive secondary: performance evaluation and field testing* , Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series , Vol. 4839 , February (2003) , S. 691-702 .
- [3] Roorda, Austin; Romero-Borja, Fernando; William Donnelly, III; Queener, Hope; Hebert, Thomas & Campbell, Melanie: *Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy* In: Opt. Express , Vol. 10 , Nr. 9 OSA (2002) , S. 405-412 .
- [4] Wright, A. J.; Poland, S. P.; Girkin, J. M.; Freudiger, C. W.; Evans, C. L. & Xie, X. S.: *Adaptive optics for enhanced signal in CARS microscopy* In: Opt. Express , Vol. 15 , Nr. 26 OSA (2007) , S. 18209-18219 .
- [5] Martin, H. M.; Brusa Zappellini, G.; Cuerden, B.; Miller, S. M.; Riccardi, A. & Smith, B. K.: *Deformable secondary mirrors for the LBT adaptive optics system* , Advances in Adaptive Optics II , Vol. 6272 , July (2006) , S. 0U .
- [6] Ruppel, Thomas; Lloyd-Hart, Michael; Zanotti, Daniela & Sawodny, Oliver: *Modal Trajectory Generation for Adaptive Secondary Mirrors in Astronomical Adaptive Optics* , IEEE International Conference on Automation Science and Engineering CASE , September (2007) , S. 430-435 .

Modelling and Simulation of a Mobile Robot-Assisted Gait Rehabilitation System

Dipl. –Ing. Siniša Slavnić *

* Institut für Automatisierungstechnik (IAT)
Universität Bremen
Otto-Hahn Allee 1, NW1, 28359 Bremen
+49 421 218 62438
Fax: +49 421 218 4596
E-Mail: slavnic@iat.uni-bremen.de

Prof. Dr.-Ing. Axel Gräser**

** Institut für Automatisierungstechnik (IAT)
Universität Bremen
Otto-Hahn Allee 1, NW1, 28359 Bremen
+49 421 218 62444
Fax: +49 421 218 4596
E-Mail: ag@iat.uni-bremen.de

Keywords: modelling of multibody mechanical systems, gait analysis, dynamically balanced walking

Gait rehabilitation after neurological injury is a long and exhausting process that demands a high physical and psychological effort from both patient and therapist. Manual therapy as a very first approach in gait rehabilitation has a number of disadvantages such as: limited number of steps per one therapy session, physical exhaustion of the patient and therapists, long therapy process and non-optimal gait pattern. In order to promote and improve process of gait rehabilitation a number of gait rehabilitation devices have been investigated and developed.

Most of today's gait rehabilitation systems are stationary [1], [2], [3], [4]. Patient walks on a treadmill while his/her legs are driven by the therapists in a case of manual therapy or by the robotic system in a case of robotized system. Patient is forced to "walk in place" without possibility to move from one place to other. Hence, patient is not able to fulfil the very first goal of human walking, to safely move from one place to other. Attempts have been made to overcome this problem by employing virtual reality systems, where walking from one point to other has been simulated.

Within the frame of the RoboWalker project which is under progress at the Institute of Automation (IAT) a concept of a mobile exoskeleton based rehabilitation system has been proposed. The system combines mobile support platform and an exoskeleton with actuated hip and knee joints (Figure 1). Also, vertical and lateral motions of the trunk (pelvis) are allowed and actuated together with pelvis rotation around the axis which direction is in direction of walking. This selection of the allowed and controlled degrees of freedom (DoF) differs from the existing gait rehabilitation systems in which hip and knee joints are usually actuated in sagittal plane, besides vertical translation of the trunk [1], [2]. Some stationary systems are based on

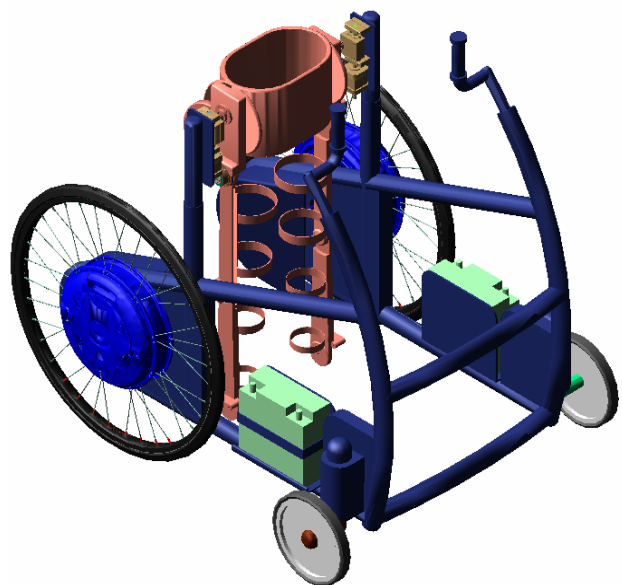


Figure 1: Mechanical design concept of the RoboWalker system

programmable (movable) footplates [3], [4]. Therefore, patients in existing gait rehabilitation systems relearn walking without possibility to translate their CoM in frontal plane. This disadvantage disallows patients to practice dynamically balanced walking which is a one of the main characteristics of human walking. In contrast, in the system presented here, the proposed set of actuated DoF allows patients practicing dynamically balanced walking. On the Figure 2 is depicted patient's CoM displacement during walking in the rehabilitation system.

Modelling, simulation and optimization of a newly designed mobile gait rehabilitation system will be presented in this work. In order to examine functionalities of the rehabilitation system, mechanical models of the human and the rehabilitation system have been deployed, using software for modelling mechanical systems (MSC Adams and LifeMod) as well as MATLAB. Model of the human consists of 19 segments (3 leg segments, 4 arm segments, 3 torso segments, one neck segment and head segment) which are interconnected with spherical joints. The exoskeleton consists of 3 leg segments and a torso segment. Motion data for experiments are obtained by marker based motion capture system and markerless system that has been developed at the IAT institute. The mechanical model of the human has been coupled with mechanical model of the rehabilitation system and numbers of simulation scenarios have been investigated.

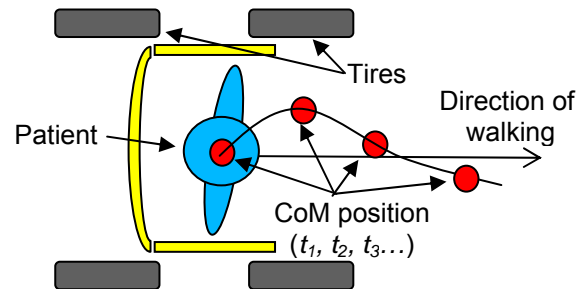


Figure 2: Displacement of the patient's centre of mass (CoM) during walking in rehabilitation system (top view)

Simulation results show that the presented concept of the mobile robot assisted gait rehabilitation system has advantage in providing a patient practicing walking that is similar to "normal" walking (walking of the healthy person). This could have as a consequence promotion of the gait rehabilitation process and reduction of time needed for successful rehabilitation.

Literature:

- [1] Riener, R.; Lunenburger, L.; Jezernik, S.; Anderschitz, M.; Colombo, G. & Dietz, V. Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: first experimental results IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2005, 13, 380-394
- [2] "Autoambulator", on the www, url: <http://www.autoambulator.com>
- [3] Schmidt, H.; Sorowka, D.; Hesse, S. & Bernhardt, R. Design of a robotic walking simulator for neurological rehabilitation Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, 2002, 2, 1487-1492
- [4] Hesse, S.; Werner, C.; Uhlenbrock, D.; Frankenberg, S.; Bardeleben, A. & Brandl-Hesse, B. An Electromechanical Gait Trainer for Restoration of Gait in Hemiparetic Stroke Patients: Preliminary Results Neurorehabil Neural Repair, 2001, 15, 39-50

Modellierung und Steuerung eines strukturelastischen Roboters

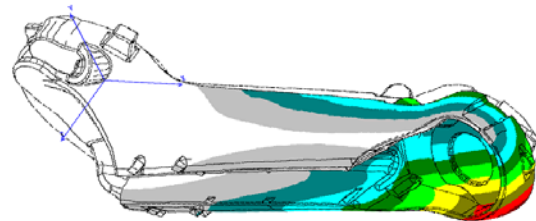
Matthias J. Reiner *

* Institut fuer Robotik und Mechatronik
Deutsches Zentrum fuer Luft- und Raumfahrt e.V.
Münchner Str. 20, 82234 Wessling
Tel: +49 (8153) 28-1630
Fax: +49 (8153) 28-1441
E-Mail: Matthias.Reiner@dlr.de

Schlüsselwörter: Nichtlineare inverse Systeme, Identifikation, Optimierung, strukturelastische Roboter, Vorsteuerung

Von Seiten der Industrie werden stetig steigende Anforderungen bezüglich der Genauigkeit und Geschwindigkeit von Roboter gestellt. Die Präzision der Roboter, auch bei hohen Geschwindigkeiten, muss vor allem durch den gezielten Einsatz von fortschrittlichen Steuerungs- und Regelungsalgorithmen erreicht werden.

Durch die steigenden Anforderungen müssen für diese Algorithmen möglichst genaue Modelle verwendet werden, in welchen nicht nur die Elastizität der Antriebsstränge [1] sondern auch die Elastizität der Struktur (Abbildung 1)



*Abbildung 1: Verformung einer
Roboter-Schwinge unter hohen
Kräften*

berücksichtigt wird. Hierzu zählen insbesondere Torsions- und Biegeschwingungen der Bauteile, sowie Kippsteifigkeiten der Lagerungen der Gelenke. Diese – hier unter dem Begriff Strukturelastizität bezeichneten – Effekte begrenzen die erreichbare Genauigkeit und das Fahrverhalten des Roboters, wenn sie nicht in der Steuerung und Regelung berücksichtigt werden. Als zusätzlich Einschränkung sind hierbei die beschränkte Rechenzeit, sowie die minimale Sensorik der Roboter, welche nur aus Winkel-Resolvern an den Achsen der Motoren besteht, zu berücksichtigen.

Um eine modellbasierte Steuerung des Roboters zu entwickeln wurden detaillierte, modular aufgebaute und skalierbare nichtlineare Modelle erstellt:

Die Antriebsstränge haben einen entscheidenden Einfluss auf die Dynamik eines Roboters. Es wurden daher Module entwickelt mit denen nichtlineare Getriebeigenschaften, Wirkungsgrade von Antriebssträngen und Hysterese-Eigenschaften der Getriebe modelliert werden können. Diese Effekte wurden so implementiert, dass die Gleichungen über einen nichtlinearen DAE-Ansatz invertierbar sind, die Module daher ungeändert auch für die Erstellung von inversen Modellen verwendet werden können. Für die elastische Struktur des Roboters wurden Ansätze in unterschiedlichen Detaillierungsgraden modelliert. Angefangen von modal reduzierten FEM-Modellen der Strukturteile aus CAD-Daten [2] bis hin zu Balkenersatzmodellen.

Zur Identifikation dieser Modelle, welche über eine große Anzahl von Parametern verfügen, wurde ein neues mehrstufiges Identifikationsverfahren entwickelt. Die Identifikation erfolgt hierbei optimierungsgestützt in mehreren Schritten auf der Basis von umfangreichen Messdatensätzen. Der große Rechenaufwand, welcher durch den Einsatz von globalen Optimierungsalgorithmen entsteht, wird durch eine Parallelisierung der Algorithmen auf einem Rechen-Cluster bewältigt. Das mehrstufige Identifikationsverfahren ist dabei so gewählt, dass ein möglichst großer Parameterbereich mit minimalem Rechenaufwand abgedeckt wird, wodurch ein globales Optimum der Parameter gefunden werden kann. Mit Hilfe dieses Identifikationsprozesses ist es möglich, die Parameter der erstellten Modelle so zu bestimmen, dass eine sehr gute Übereinstimmung der Modelle mit den Messdaten global - im gesamten Arbeitsbereich des Roboters - erreicht wird.

Um aus den erstellten Modellen eine modellbasierte (Vor-) Steuerung, als Teil eines Regelungskonzepts mit zwei Freiheitsgraden (Abbildung 2), abzuleiten wurden die systemdynamischen Eigenschaften der nichtlinearen Modelle analysiert. Hierbei zeigt sich, dass eine elastische Modellierung der Struktur des Roboters dazu führt, dass das exakte inverse Modell des

Roboters instabil ist (instabile Nulldynamik [3]). Es ist also nicht möglich Ortsvektor und Drehmatrix an der Spitze des Roboters vorzugeben und die hierfür benötigten Motorgrößen exakt zu berechnen, wenn das zu invertierende Modell elastische Strukturteile enthält.

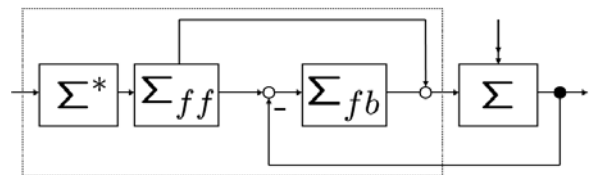


Abbildung 2: Regelungsstruktur mit zwei Freiheitsgraden

Um dieses Problem zu lösen wurden neue Approximationsansätze entwickelt und untersucht, welche es ermöglichen die Modelle näherungsweise zu invertieren. Das Ergebnis ist ein (approximatives) inverses, stabiles Modell des nichtlinearen Systems. Die so gewonnene Vorsteuerung wurde experimentell an zwei Robotern mit unterschiedlichen dynamischen Eigenschaften getestet und validiert und führt zu einer deutlichen Verbesserung im Fahrverhalten gegenüber einer Vorsteuerung, in welcher keine Strukturelastizität berücksichtigt wird. Insbesondere fahren die Roboter genauer und die Amplituden von Vibrationen an der Spitze der Roboter werden im Schnitt um etwa 30 % reduziert.

Literatur:

- [1] M. Thümmel. Modellbasierte Regelung mit nichtlinearen inversen Systemen und Beobachtern zur Optimierung der Dynamik von Robotern mit elastischen Gelenken. Dissertation, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme Technische Universität München, 2007.
- [2] M. Reiner, A. Heckmann, M. Otter Inversion based control of flexible body systems. Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC), 2008.
- [3] A. Isidori. Nonlinear Control Systems. Springer, 1995.

Kollisionsvermeidung bei stationären Robotern mit Hilfe künstlicher Kraftfelder

Dr.-Ing. Alexander Winkler *

* Professur Robotersysteme
Technische Universität Chemnitz
09107 Chemnitz
0371 / 531-33495
0371 / 531-833495

alexander.winkler@e-technik.tu-chemnitz.de

Prof. Dr.-Ing. Jozef Suchý **

** Professur Robotersysteme
Technische Universität Chemnitz
09107 Chemnitz
0371 / 531-33427
0371 / 531-833427

jozef.suchy@etit.tu-chemnitz.de

Schlüsselwörter: Kraft-/ Momentregelung, Nullkraftregelung, Handführen von Robotern, Kollisionsvermeidung, künstliche Kraftfelder, virtuelle Ladungen

Die Mehrzahl der heute eingesetzten Industrieroboter arbeitet hinter trennenden Schutzeinrichtungen. Zunehmend gewinnt aber die Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern mehr und mehr an Bedeutung, sodass ihre Arbeitsräume miteinander verschmelzen. Im Gegensatz zur Abarbeitung eines festen Programmzyklus in einer unveränderlichen Umgebung muss bei der Mensch-Roboter Interaktion über Algorithmen zur aktiven Kollisionsvermeidung nachgedacht werden. Im hier präsentierten Fall, soll die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter auf der Basis von Kräften und Momenten erfolgen. Dieses sog. Handführen eines Roboters, realisiert durch eine Nullkraft-/ bzw. Impedanzregelung, kann z. B. für gemeinsame Handhabungs- und Montageaufgaben oder zur intuitiven Roboterprogrammierung verwendet werden. Dabei ist es wünschenswert, dass Kollisionen zwischen Roboter und Umgebung vermieden werden. Eine Methode dies zu realisieren ist, der Einsatz sog. künstlicher Kraft- bzw. Potentialfelder, wie sie auch zur Pfadplanung von stationären oder mobilen Robotern verwendet werden. In der Nähe von Hindernissen wirken dann virtuelle, abstoßende Kräfte auf den Endeffektor des Roboters, die dem Bediener intuitiv die Kollisionsgefahr anzeigen.

Für die Generierung der künstlichen Kräfte in Echtzeit wird an dieser Stelle ein Algorithmus auf der Basis von virtuellen Punktladungen vorgeschlagen. Zwischen den zwei Punktladungen Q_1 und Q_2 mit dem Abstand r wirkt die elektrostatische Kraft F_{12} .

$$\vec{F}_{12} = -\frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{\|\vec{r}\|^2} \frac{\vec{r}}{\|\vec{r}\|}$$

Da es sich um eine virtuelle Kraft handelt, ist dieser Zusammenhang zwischen Abstand und Kraft nicht obligatorisch und kann daher mit Hilfe der Funktion V verallgemeinert werden.

$$\vec{F}_{12} = V(\|\vec{r}\|) \frac{\vec{r}}{\|\vec{r}\|}$$

Auf der Oberfläche von Hindernissen im Arbeitsraum des Roboters wird nun eine entsprechende Anzahl n von virtuellen Punktladungen platziert, siehe Abbildung 1. Die resultierende virtuelle Kraft F_v , welche auf den Endeffektor wirkt, ergibt sich aus der Überlagerung aller Teilkräfte. Es gilt das Superpositionsprinzip, wobei der Vektor

\bar{p} die Endeffektorposition beschreibt und die Vektoren \bar{e}_i die Lage der einzelnen Punktladungen repräsentieren.

$$\bar{F}_V = \sum_{i=1}^n \left[v(\|\bar{p} - \bar{e}_i\|) \frac{\bar{p} - \bar{e}_i}{\|\bar{p} - \bar{e}_i\|} \right]$$

Neben der aktiven Wirkung der künstlichen Kraft auf den Roboter kann es zur Vermeidung von ungewünschten Reaktionen (z. B. Schwingungen) sinnvoll sein, zusätzlich eine virtuelle Dämpfung zu aktivieren. Im einfachsten Fall kann dabei ein proportionaler Zusammenhang zwischen Kraft und Dämpfung gewählt werden.

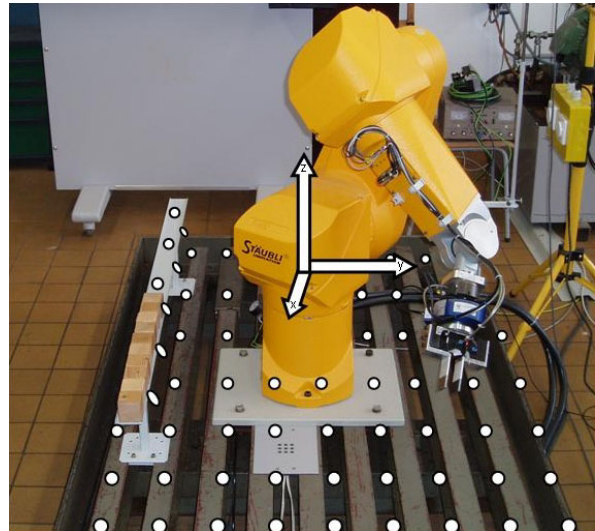


Abbildung 1: Virtuelle Punktladungen im Arbeitsraum des Roboters

Literatur:

- [1] Arai, T., Ogata, H., Suzuki, T.: Collision avoidance among multiple robots using virtual impedance. In: Proc. of IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 479–485 (1989)
- [2] Chong, N.Y., Kotoku, T., Ohba, K., Tanie, K.: Virtual repulsive force field guided coordination for multi-robot collaboration. In: Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1013–1018 (2001)
- [3] Hogan, N.: Impedance control, an approach to manipulation: Part i, ii, iii. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 107, 1–24 (1985)
- [4] Khatib, O.: Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. The International Journal of Robotics Research 5(1), 90–98 (1986)
- [5] Schraft, R.D., Meyer, C., Parlitz, C., Helms, E.: Powermate - a safe and intuitive robot assistant for handling and assembly tasks. In: Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4085–4090 (2005)
- [6] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G.: Robotics - Modelling, Planning and Control. Springer (2009)
- [7] Som, F.: Innovative robot control offers more operator ergonomics and personnel safety. In: Proc. of Joint Conference on Robotics - 37th International Symposium on Robotics and 4th German Conference on Robotics (2006)
- [8] Tsuji, T., Kaneko, M.: Noncontact impedance control for redundant manipulators. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans 29(2), 184–193 (1999)
- [9] Winkler, A., Suchý, J.: Force-guided motions of a 6-d.o.f industrial robot with a joint space approach. Advanced Robotics 20(9), 1067–1084 (2006)

Robustheit in der Systembiologie: mehrfachstationäre Lösungen

Carsten Conradi ^{*,**}

* Fachgebiet Regelungssysteme
Technische Universität Berlin
Einsteinufer 17
030 314-22999
030 314-21137

**FG System- und Regelungstheorie
MPI Magdeburg
Sandtorstr. 1
0391/6110 476
0391/6110 540
conradi@mpi-magdeburg.mpg.de

Schlüsselwörter: Robustheit; mehrfachstationäre Lösungen; Systembiologie;

In der Systembiologie sind mathematische Modelle in Form gewöhnlicher Differentialgleichungen zu einem allgemein akzeptierten Werkzeug geworden. So werden beispielsweise Differentialgleichungsmodelle, die mehrfachstationäre Lösungen zulassen, oft zur Beschreibung des Zellzyklus oder zur Beschreibung von Signalübertragungssystemen verwendet. Im ersten Fall repräsentieren unterschiedliche stationäre Lösungen verschiedene Phasen des Zellzyklus, im zweiten Fall die An- oder Abwesenheit externer Stimuli oder zelluläre Entscheidungen wie Zelldifferenzierung oder Apoptose.

Bei der Modellierung biologischer Systeme ist man allerdings in erheblich größerem Maße mit Unsicherheit konfrontiert als bei den meisten technischen Anwendungen. In vielen Fällen existieren mehrere a-priori gleich wahrscheinliche Modellstrukturen, und die Modellparameter sind oft mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Im systembiologischen Kontext ist dann von besonderem Interesse, in welchem Umfang bestimmte in der Realität beobachtete qualitative Eigenschaften (wie z.B. die Existenz mehrfach stationärer Lösungen) bezüglich Struktur- und Parameterunsicherheit sowie bezüglich externer Einflüsse robust sind [1]. Zur Beantwortung dieser Frage wurde in [3] eine Methode vorgeschlagen, die auf einem Random Walk im Parameterraum basiert.

In diesem Vortrag wird die Robustheit eines biochemischen Systems analysiert, das als zentraler Baustein sowohl in Signaltransduktionsprozessen als auch in der Regulation des Zellzyklus vorkommt: Wir untersuchen die mehrfache Phosphorylierung eines Proteins. Für dieses System ist es möglich, die Parametermenge, in der mehrfachstationäre Lösungen auftreten, analytisch zu beschreiben [2,4]. Um den Einfluss der Anzahl der Phosphorylierungsschritte auf die Robustheit der Existenz mehrfachstationärer Lösungen zu untersuchen, werden Systeme mit bis zu sechs Phosphorylierungen betrachtet.

Literatur:

- [1] Stelling, J.; Sauer, U.; Szallasi, Z.; Francis J. Doyle, I.; Doyle, J. Robustness of Cellular Functions Cell, 2004 , 118 , 675-685
- [2] Conradi, C.; Flockerzi, D.; Raisch, J. Multistationarity in the activation of an MAPK: parametrizing the relevant region in parameter space Mathematical Biosciences, 2008 , 211 , 105-131
- [3] Dayarian, A.; Chaves, M.; Sontag, E.D.; Sengupta, A.M. Shape, Size, and Robustness: Feasible Regions in the Parameter Space of Biochemical Networks PLoS Comput Biol, Public Library of Science, 2009 , 5 , e1000256
- [4] Holstein, K. Mathematical analysis of multisite phosphorylation: existence of multiple steady states, Diplomarbeit, Universität Magdeburg, 2008.

Modellbildung und Regelung des extrakorporalen Gasaustausches

T. Wartzek¹, M. Walter¹, A. Kashefi², A. Stollenwerk³, R. Kopp⁴, S. Leonhardt¹

1) Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik, RWTH Aachen, Pauwelsstrasse 20, 52074 Aachen. Email: medit@hia.rwth-aachen.de

2) Lehrstuhl für Angewandte Medizintechnik, RWTH Aachen

3) Lehrstuhl Informatik 11, Embedded Systems, RWTH Aachen

4) Fachübergreifende Klinik für operative Intensivmedizin, Universitätsklinikum Aachen

In schweren Fällen des akuten Lungenversagens (*ARDS, Acute Respiratory Distress Syndrome*) reicht der durch die Beatmung erreichbare Gasaustausch mitunter nicht aus, den physiologischen Bedarf zu decken. Bei solchen vorgeschädigten Lungen besteht die Gefahr, diese durch die Therapie weiter schädigen (*VILI, Ventilator Induced Lung Injury*). Eine zusätzliche extrakorporale Oxygenierung kann das Überleben des Patienten sichern und die Lunge zur Regeneration entlasten. Dazu wird dem Patienten durch Kanülen venöses sauerstoffarmes Blut entnommen und in einer künstlichen Lunge (Oxygenator) gepumpt. Über Membran-Hohlfasern erfolgt der Gasaustausch, so dass das venöse Blut mit O_2 angereichert und CO_2 eliminiert wird. Die Rückführung des jetzt mit O_2 angereicherten Blutes erfolgt wieder in eine Vene.

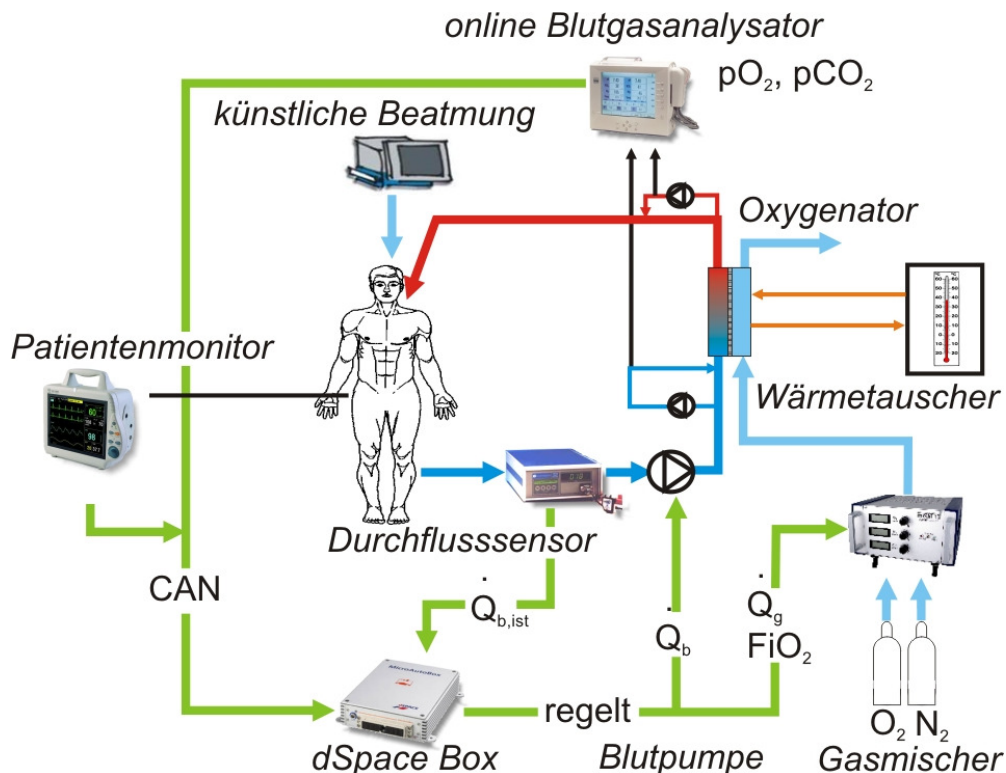


Bild 1: Komponenten der geregelten extrakorporalen Oxygenierung

Bisher erfolgte die quantitative Einstellung der Betriebsparameter der künstlichen Lunge, wie z.B. Blutfluss, Gasfluss sowie Gaskonzentration, rein manuell und heuristisch. Während dafür bei einer Herz-Lungen-Maschine für kardiologische Eingriffe ein Kardiotechniker permanent zuständig ist, erfolgt heutzutage auf einer Intensivstation i.d.R. nur eine intermittierende Kontrolle und eine manuelle Anpassung durch das medizinische Personal in größeren Zeitabständen. Damit auch in einem solchen weniger stark unterstützten Betrieb eine permanente

patientenindividuelle Anpassung gewährleistet werden kann, wurde das Therapie-Szenario um aktorische und sensorische Komponenten erweitert (siehe Bild1). Dadurch ist eine automatische Anpassung an den Patientenstatus möglich, was zu einer verbesserten Qualität der Therapie und einer Entlastung des medizinischen Personals führt.

Die zentrale sensorische Komponente ist dabei ein Online-Blutgasanalysator, der fortwährend die Gaskonzentrationen von O_2 und CO_2 im Blut vor und hinter dem Oxygenator misst. Über die elektrische Ansteuerung der Gasmenge und Gaskonzentration kann dann die Gaskonzentration des zurückgeführten Blutes mit auf einem dSPACE System implementierten Algorithmen geregelt werden. Basierend auf einer ausführlichen Modellbildung und Parametrierung des Prozesses wurden ein Smith-Prädiktor und ein PI Regler entworfen und in in-vitro und in-vivo Versuchen verglichen.

Konzeption und Realisierung eines aktiven Fahrwerks mit Preview

Dr.-Ing. Andreas Schindler *

* AUDI AG I/EF-13
85045 Ingolstadt
+49 (841) 8936145
andy_schindler@web.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Bretthauer **

** Institut für Angewandte Informatik/
Automatisierungstechnik (AIA)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Campus Süd, Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe
+49 (721) 608 - 7970
+49 (721) 608 - 7971
bretthauer@iai.fzk.de

Schlüsselwörter: Aktives Fahrwerk, vorausschauende Regelstrategie, Preview

Geregelte aktive Fahrwerke, wie sie heute in vielen Fahrzeugen verfügbar sind, haben einen hohen Reifegrad erreicht.

Im Gegensatz zu passiven Fahrwerken erlauben sie die dynamische Anpassung der Federungs- und Dämpfungscharakteristik und können so flexibel auf Parameterschwankungen, wie z.B. unterschiedliche Zuladung, Geschwindigkeit oder variierende Umgebungsbedingungen, wie Straßenbeschaffenheit oder Witterungseinflüsse, reagieren. Damit ermöglichen aktive Fahrwerke heute die weitgehende Auflösung des Zielkonflikts zwischen Fahrsicherheit und Fahrkomfort.

Dennoch stoßen selbst aktive Systeme an konzeptionelle Grenzen, da solche geregelte Fahrwerke erst auf Hindernisse reagieren können, wenn das Fahrzeug bereits darüber fährt. Einen Ausweg aus diesem Dilemma bieten vorausschauende Fahrwerke (engl. Fahrwerke mit „Preview“), die den vorausliegenden Straßenhöhenverlauf messen und ihr Verhalten **proaktiv** anpassen können (siehe Abb. 1).



vorausschauendem Fahrwerk

In der Fachliteratur finden sich deshalb schon seit fast vier Jahrzehnten Arbeiten zum Thema „Aktive Fahrwerke mit Preview“, in denen die Nutzung der Information über das vorausliegende Straßenprofil zu regelungstechnischen Zwecken beschrieben wird. Theoretische Arbeiten zeigen, dass sich mit Preview ein erheblicher Komfortvorteil bei gleichzeitiger Energieeinsparung realisieren lässt [1].

In der Vergangenheit verhinderte die mangelnde Verfügbarkeit leistungsfähiger Technik die Umsetzung von Preview. So existierten keine geeigneten Preview-Sensoren, die Analog- bzw. Digitalrechner waren nicht leistungsfähig genug, und fahrzeugtaugliche Bauteile für aktive Fahrwerke waren nicht vorhanden.

Dieses Manko besteht heutzutage nicht mehr. Mit der zunehmenden Verbreitung von Assistenzsystemen im Fahrzeug steht derzeit eine Vielzahl von Sensorsystemen zur Umfelderkennung zur Verfügung. Weiterhin gehören leistungsfähige Echtzeitrechner-systeme heute zum Stand der Technik. Aktive Fahrwerke sind seit Jahren im Serien-einsatz und haben ihre Robustheit bewiesen [2].

Anders sieht es bei der Algorithmik für aktive Fahrwerke mit Preview aus. Schon seit mehr als 40 Jahren werden Regleransätze für aktive Fahrwerke mit Vorausschau veröffentlicht [3]. Bisher existiert jedoch noch kein Ansatz der die Randbedingungen im realen Fahrzeug in ausreichendem Maße berücksichtigt, so dass bis heute noch keine fahrzeugtaugliche Umsetzung gelungen ist.

Des Weiteren bleibt die Frage nach der Generierung des Preview-Straßensignals unbeantwortet. Bisher existiert noch kein praxistauglicher Algorithmus, der aus realen Sensorrohdaten in Echtzeit ein Preview-taugliches Straßenhöhenprofil rekonstruiert [4].

Als Lösungsvorschlag für obige Fragestellungen wird deshalb im Vortrag ein neues Regelungskonzept für ein aktives Fahrwerk mit Vorausschau vorgestellt, das für den realen Fahrzeugeinsatz und die damit verbundenen Randbedingungen konzipiert ist. Weiterhin wird ein neues Sensorkonzept mit zwei optischen Vorausschau-Sensoren zur Abtastung des Straßenhöhenverlaufs präsentiert und ein neuer Algorithmus zur Rekonstruktion des erforderlichen Straßenhöhenprofils hergeleitet.

Anhand von Simulationsuntersuchungen werden zuerst mögliche Potentiale des neuen Preview-Konzepts gezeigt. Anschließend wird über die Implementierung der neuen vorausschauenden Regelstrategie im Fahrzeug berichtet. Zum Abschluss wird anhand von Fahrzeugmessungen auf öffentlichen Straßen die Leistungsfähigkeit der neuen integralen Preview-Strategie bewiesen.

Die Ergebnisse der Arbeiten zeigen, dass sich durch die Fahrwerkregelung mit Preview-Vorsteuerung eine erhebliche Verbesserung des Fahrkomforts gegenüber einem aktiven Fahrwerk mit einer aktuell verfügbaren, leistungsfähigen Fahrwerk-regelung ohne Vorausschau erzielen lässt.

Literatur:

- [1] W. Foag. „Regelungstechnische Konzeption einer aktiven PKW-Federung mit Preview“, *Institut für Dynamik der Flugsysteme, DLR, Dissertation*, 1989
- [2] M. Pyper, W. Schiffer, W. Schneider, „Active Body Control – Von der Blattfederung zum aktiven System für mehr Fahrsicherheit und Fahrkomfort“, *Verlag Moderne Industrie*, 2003
- [3] E. K. Bender, „Optimal Linear Preview Control with Application to Vehicle Suspension“, *Trans. of the ASME, Journal of Basic Engineering* 2, S. 213–221, 1968.
- [4] A. Schindler, „Neue Konzeption und erstmalige Realisierung eines aktiven Fahrwerks mit Preview-Strategie“, *Institut für Angewandte Informatik/ Automatisierungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation*, 2009