

42. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD
20. – 22. FEBRUAR 2008

Programm und Kurzfassungen*

*zum Download: www.iitb.fraunhofer.de/Boppard

Mittwoch, 20. Februar 2008

- Nachmittags **Anreise**
18:00 **Abendessen** im Bellevue Rheinhotel
- 19:30** **Abschließende Diskussion des Konzepts „Automatisierungstechnik 2020“ in 4 Arbeitsgruppen im Bellevue Rheinhotel**
- Raum „A/D“ (1. OG):** Theorie
Raum „Atelier“ (3. OG): Anwendung
- Raum „C“ (1. OG):** Lehre
Raum „B“ (1. OG): Bedeutung

Donnerstag, 21. Februar 2008

- 08:15 – 08:30** **Eröffnung und Begrüßung (Raum 1)**
Prof. Dr.-Ing. O. Sawodny

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
08:30 – 10:00	Fahrzeuge Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dietmayer		Stochastische Methoden i. d. Regelungstechnik Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze	
08:30 – 09:00	Kriterien und Methoden zur Führung von Fahrzeugkolonnen <i>Jan Maschuw (Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen, Prof. Abel, Gr. 1)</i>	1	Robuste Trajektorienplanung unter expliziter Berücksichtigung von nichtnormalverteilten Unsicherheiten durch Gaußsche Mischmodelle <i>Niko Rossner (Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, TU Berlin, Prof. King, Gr. 2)</i>	7
09:00 – 09:30	Gitterbasierte Sensorfusion zur Fahrbereichsanalyse auf Basis der Evidenz-Theorie <i>Jan Effertz (Institut für Regelungstechnik, TU Braunschweig, Prof. Schumacher, Gr. 4)</i>	3	Evaluierung von wahrscheinlichkeitstheoretischen Inferenzverfahren für dynamische Systeme <i>Marc-André Beyer (Regelungssysteme und Steuerungstechnik, Ruhr-Uni Bochum, Prof. Reinig, Gr. 3)</i>	8
09:30 – 10:00	Methoden zur hochgenauen Positionsbestimmung von Fahrzeugen im Bereich Fahrerassistenzsysteme durch Sensordatenfusion von GPS und weiterer Sensorik <i>Daniel Niehues (Institut für Verkehrstelematik, TU Dresden, Prof. Krimmling, Gr. 10)</i>	5	Sigma-Point Kalman Filter mit Nebenbedingungen <i>P. Schneider (Lehrstuhl für Prozessautomatisierung, Uni d. Saarlandes, Prof. Janocha, Gr. 24)</i>	10

- 10:00 – 10:30** **Kaffee-/Teepause**

10:30 – 12:00	Flachheitsbasierte Methoden und verteiltparametrische Systeme Sitzungsleitung: Prof. Dr. techn. Andreas Kugi	Modellbildung Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Rudibert King
----------------------	--	---

42. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

20. – 22. FEBRUAR 2008

10:30 – 11:00	Flachheitsbasierte Zwei-Freiheitsgrade-Regelung von Speicherwasserkraftwerken <i>Michael Treuer (Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Uni Stuttgart, Prof. Welfonder, Gr. 27)</i>	12	Modellierung der dynamischen Eigenschaften von Wärmeübertragern in Biomassefeuerungen <i>Markus Gölles (Institut f. Regelungs- und Automatisierungstechnik, TU Graz, Prof. Dourdoumas, Gr. 12)</i>	18
11:00 – 11:30	Verfahren zum Entwurf einer robusten Regelung mit flachheitsbasierter Vorsteuerung <i>Daniel Zirkel (Lehrstuhl für Regelungssysteme, TU Kaiserslautern, Prof. Liu, Gr. 16)</i>	14	Entwicklung eines reduzierten Finite Elemente-Grundwassermodells für ein modellprädiktives Entscheidungshilfesystem <i>Oliver Krol (Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung Karlsruhe, Prof. Beyerer, Gr. 18)</i>	20
11:30 – 12:00	Vollständige Modale Synthese linearer verteiltparametrischer Systeme <i>Joachim Deutscher (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Uni Erlangen-Nürnberg, Prof. Roppenecker, Gr. 7)</i>	16	Modellierung der gekoppelten Regelkreise der Nahreaktion des menschlichen Auges <i>Simon Klink (Institut für Angewandte Informatik, Forschungszentrum Karlsruhe, Prof. Bretthauer, Gr. 16)</i>	22

12:00 – 14:00 Mittagessen / Pause

14:00 – 16:00	Lineare Theorie Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski		Robotik Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Martin Buss	
14:00 – 14:30	Sättigende, weich strukturvariable Regelungen <i>Michael Buhl (Lehrstuhl für Regelungstechnik, TU München, Prof. Lohmann, Gr. 5)</i>	24	Untersuchungen zum Einsatz von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren in der Robotik <i>René Franke (Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, TU Dortmund, Prof. Bertram, Gr. 8)</i>	32
14:30 – 15:00	LMI-Entwurf schneller Regelungen für lineare Regelstrecken mit Stell- und Zustandsgrößenbeschränkung <i>Dilyana Yankulova (Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, Prof. Adamy, Gr. 7)</i>	26	Sichere Pfadplanung für mobile Roboter unter Verwendung mengenbasierter Schätzalgorithmen <i>Sylvia Horn (Institut für Automatisierungstechnik, TU Dresden, Prof. Janschek, Gr. 9)</i>	35
15:00 – 15:30	Beobachter mit Zustandsaktualisierung und endlicher Konvergenzzeit für lineare Systeme <i>Tobias Raff (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Allgöwer, Gr. 26)</i>	28	Entwicklung eines quasi-omnidirektionalen mobilen Roboters <i>Ivan Masár (Lehrgebiet Prozesssteuerung und Regelungstechnik, Fernuniversität Hagen, Prof. Hoyer, Gr. 12)</i>	37
15:30 – 16:00	Entwurf stabiler schaltender Regelkreise mit Hilfe von Polvorgabeverfahren <i>Kai Wulff (Fachgebiet Regelungssysteme, TU Berlin, Prof. Raisch, Gr. 2)</i>	30	Wahrscheinlichkeitsbasierte Sturzklassifikation von zweibeinigen Robotern <i>Oliver Höhn (Institut für Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Prof. Gerth, Gr. 14)</i>	39

16:00 – 16:30 Kaffee-/Teepause

16:30 – 17:30	Plenarvortrag The Renaissance of Systems Theory in Biology and Biomedicine Opportunities and Challenges <i>Prof. Olaf Wolkenhauer (Lehrstuhl Systembiologie und Bioinformatik, Universität Rostock)</i>	S. 41
17:30 – 18:30	Vorstellung und Verabschiedung des Konzepts "AT 2020"	

18:30 Abendessen

42. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

20. – 22. FEBRUAR 2008

Freitag, 22. Februar 2008

08:30 – 10:00 Hybride dynamische Systeme Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Volker Krebs		Automatisierungstechnik Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Epple		
08:30 – 09:00	Hybride dynamische Systemmodelle in der Laufroboterregelung <i>Marion Sobotka (Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, Prof. Buss, Gr. 21)</i>	42	Automatische Re-Implementierung von Steuerungsprogrammen <i>Mohammed Bani Younis (Institut für Automatisierungstechnik, Universität der Bundeswehr Hamburg, Prof. Fay, Gr. 13)</i>	48
09:00 – 09:30	Stabilisierung der periodischen Betriebsweise ereignisgesteuerter kontinuierlicher Systeme <i>Axel Schild (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Lunze, Gr. 3)</i>	44	IT-Sicherheit auf der Feldebene von Automatisierungssystemen <i>Felix Gutbrodt (Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart, Prof. Göhner, Gr. 26)</i>	49
09:30 – 10:00	Online-Analyse von Fahrstrategien kognitiver Automobile <i>Matthias Althoff (Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, Prof. Stursberg, Gr. 21)</i>	46	Mathematischer Sicherheitsnachweis verschachtelter CRC bei der Kommunikation nach dem ISO/OSI-Modell <i>Tina Mattes (Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, TU München, Prof. Schiller, Gr. 29)</i>	50

10:00 – 10:30 Kaffee-/Teepause

10:30 – 12:00 Fehlertolerante Regelung/robuste Regelung Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Jörg Raisch		Anwendungen Sitzungsleitung: Prof. Dr. techn. Klaus Janschek		
10:30– 11:00	Integrated Design of Fault Tolerant Wireless Networked Control Systems <i>C. I. Chihaiia (Fachgebiet Automatisierungstechnik und Komplexe Systeme, Prof. Ding, Gr. 11)</i>	52	Methodisches Vorgehen zum Entwurf kontaktloser induktiver Übertragungssysteme und deren Regelung <i>Daniel Kürschner (Institut für Automation und Kommunikation, Otto von Guericke Universität Magdeburg, Prof. Jumar, Gr. 20)</i>	58
11:00 – 11:30	Diagnose und Klassifikation von Aktuatorfehlern in nichtlinearen Systemen <i>Philipp Mai (Automatisierungs- und Regelungstechnik, Universität der Bundeswehr München, Prof. Hillermeier, Gr. 21)</i>	54	Entwicklung eines Lasertrackersystems zur berührungslosen Positionsbestimmung in mechatronischen Systemen <i>Christian Wachten (Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik, TU Ilmenau, Prof. Ament, Gr. 15)</i>	60
11:30 – 12:00	LFT- und IQC Unsicherheitsmodellierung zur Stabilitätsanalyse und Synthese von Roboterregelungen <i>Matthias Löhning (Institut für Robotik und Mechatronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Wessling, Dr. Bals, Gr. 30)</i>	56	Anwendung der modellbasierten prädiktiven Regelung zur Gradient-Freeze-Halbleitereinkristallzüchtung auf der ISS <i>Konstantin Hermann (Institut für Automatisierungstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Prof. Rehkopf, Gr. 10)</i>	62

12:00 – 12:30 Abschluss / Preisverleihung durch einen Vertreter der BASF AG / Aufruf für Boppard 2009

12:30 – 13:30 Mittagessen

13:30 Ende des Kolloquiums

**42. Regelungstechnisches Kolloquium in
Boppard**

20. – 22. Februar 2008

Vortragsskizzen

Kriterien und Methoden zur Führung von Fahrzeugkolonnen

Jan P. Maschuw, Günter C. Keßler, Dirk Abel

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen
Steinbachstraße 54, 52074 Aachen
Tel. 0241 8028034
Fax 0241 8022296
J.Maschuw@irt.rwth-aachen.de

Schlüsselwörter: Fahrzeugkolonnen, H-inf Regelung, LMI, BMI

Unter der Führung von Fahrzeugkolonnen wird in diesem Vortrag das automatische Folgen eines fahrergeführten Fahrzeugs in Längsrichtung (mit konstantem Abstand) sowie in Querrichtung (auf der Spur des ersten Fahrzeugs) verstanden. Die Fahrzeuge verfügen dazu über Abstands- und Relativgeschwindigkeitssensoren sowie eine optische Erfassung der lateralen Position innerhalb der Fahrspur. Die Fahrzeuge können die gemessenen Daten über eine Funkstrecke austauschen, es werden allerdings keine infrastrukturellen Änderungen als Hilfsmittel betrachtet.

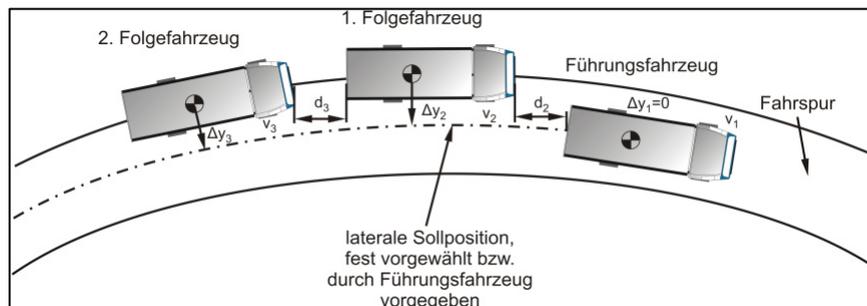


Abbildung 1: Fahrzeugkolonne mit 2 Folgefahrzeugen

Hinsichtlich der Kopplung innerhalb einer Kolonne beeinflusst die Längsdynamik jedes Fahrzeugs direkt die Abstände der umgebenden Fahrzeuge. Die Querdynamik der Fahrzeuge beeinflusst hingegen nicht die Ablage anderer Fahrzeuge aus der Kolonne. Die Spurfolge des Führungsfahrzeugs lässt sich somit für jedes einzelne Fahrzeug realisieren und die Ablagemessung des Führungsfahrzeugs als zukünftige Solltrajektorie, die durch die Funkstrecke übermittelt wird, einbeziehen (siehe dazu Abbildung 1). Als regelungstechnische Methode bietet sich daher für jedes Folgefahrzeug die modellgestützte prädiktive Regelung an, die in [1] für Fahrzeugkolonnen vorgestellt wurde.

Durch die bereits beschriebene Fahrzeugkopplung in Längsrichtung lassen sich prädiktive Ansätze für eine konstante Abstandhaltung nicht anwenden. Ziel der längsdynamischen Regelung ist primär die Minimierung der Abstandsfehler, die sich durch die Beschleunigung des Führungsfahrzeugs als Störung ergeben. Neben der Stabilisierung jedes einzelnen Fahrzeugs muss die sog. Kolonnenstabilität (die eine Begrenzung der Fahrzeugzustände entlang der Kolonne beschreibt) erreicht werden. In der Literatur, siehe z.B. [2], wird dieser Begriff üblicherweise nur im

Zusammenhang mit Abstandsfehlern betrachtet. Gerade bei kritischen längsdynamischen Manövern (mit starken Beschleunigungen bzw. Verzögerungen) ist allerdings auch eine Begrenzung der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen für die gesamte Kolonne notwendig - eine starke Überhöhung der notwendigen Beschleunigung von Folgefahrzeugen kann durch die Sättigungseffekte der Reifen, die nur eine maximale Reibkraft zwischen Fahrbahn und Reifen zulassen, nicht mehr erreicht werden. Die Kriterien an die Längsführung setzen sich also aus Begrenzungen von Abstandsfehlern, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zusammen. Qualitativ lassen sich diese Grenzen ebenso im Frequenzbereich als obere Schranken für die H-inf Norm der einzelnen Störübertragungsfunktionen formulieren. Das Mittel der linearen Matrixungleichung (LMI) erlaubt nun die gewichtete Minimierung der angesprochenen Grenzen.

Die Längsdynamik jedes einzelnen Fahrzeugs wird im Wesentlichen durch das Modell des Antriebsstrangs aus Motor, Getrieben, Kupplungen, Bremsen aber auch unterlagerter Regelungen, die eine gewünschte Beschleunigung realisieren, beschrieben. Näherungsweise kann dies durch ein Verzögerungsglied erster Ordnung dargestellt werden, dessen Zeitkonstante allerdings stark vom Betriebspunkt (insbesondere der Geschwindigkeit) abhängt und in den verwendeten Versuchsfahrzeugen einen Bereich von $0.1s < T < 2s$ überstreicht. Die robuste Stabilität des Systems mit den zeitveränderlichen Parametern lässt sich mittels quadratischer Stabilität nachweisen. Da die Parameter affin in das lineare Modell der Kolonne eingehen, kann diese Bedingung durch einen weiteren (endlichen) Satz von LMIs formuliert und in die bisherige Optimierung aufgenommen werden.

Strukturelle Einschränkungen stellen eine weitere Anforderung der Regelung dar. Damit können unterschiedliche Topologien der funkbasierten Kommunikation dargestellt werden, die sich beispielsweise bei Ausfall einzelner Funkverbindungen ergeben können. Eine Optimierung, die diese Einschränkungen berücksichtigt, wurde bereits in [3] vorgestellt - allerdings ohne auf die oben genannten H-inf Bedingungen einzugehen. Werden beide Kriterien formuliert, erreicht man einen Übergang von der bisherigen LMI Formulierung auf bilineare Matrixungleichungen (BMI), siehe [4]. An diesen Erweiterungen wird derzeit am Institut gearbeitet.

Literatur:

- [1] Keßler, G. C.; Maschuw, J. P.; Zambou, N. & Bollig, A. (2007): *Konzept zur Sollwertgenerierung und Modellgestützten Prädiktiven Regelung für die Querführung von Nutzfahrzeugkonvois*, at - Automatisierungstechnik, 298-305
- [2] Lu, X. Y. & Hedrick, J. K. (2004): *Practical String Stability for Longitudinal Control of Automated Vehicles*, Vehicle Systems Dynamics Supplement, 41, 577-586
- [3] Maschuw, J. P.; Keßler, G. C. & Abel, D. (2007): *An Approach to Network based Criteria in Longitudinal Control of Vehicle Platoons*, IFAC European Control Conference 2007
- [4] VanAntwerp, J. G. & Braatz, R. D. (2000): *A tutorial on linear and bilinear matrix inequalities*, Journal of Process Control, vol. 10, 363-385

Gitterbasierte Sensorfusion zur Fahrbereichsanalyse auf Basis der Evidenz-Theorie

Jan Effertz *

*Institut für Regelungstechnik
TU-Braunschweig
Hans-Sommer-Str. 66
0531 391 3812
0531 391 5194
effertz@ifr.ing.tu-bs.de

Schlüsselwörter: Sensorfusion, Occupancy Grids, Fahrbereichsanalyse

Ansätze zur Fahrzeug-Umfeldererkennung auf Basis sog. Belegungsgitter (occupancy grids) sind in der mobilen Robotik Stand der Technik [2]. Ihr Einsatz im Bereich der automobilen Fahrzeug-Umfeldererkennung ist aber zum gegenwärtigen Zeitpunkt recht begrenzt, da in diesem Kontext aufgrund der geringen Bandbreite der Datenbusse und der am Markt vorhandenen Fahrerassistenzsensorik zumeist klassische Tracking-Verfahren auf Objektbasis verbreitet sind.

Im Rahmen dieses Beitrages wird ein Grid-basiertes Verfahren zur Fahrbereichsanalyse vorgestellt, welches das Feld der Belegungsgitter für einen Einsatz im automobilen Umfeld zugänglich macht. Zielsetzung ist die Erkennung des befahrbaren Bereiches vor dem eigenen Fahrzeug, um eine kollisionsfreie Fahrt entlang des Straßenverlaufs zu ermöglichen. Zum Einsatz kommen zwei Einebenen-Laserscanner, ein Stereovisions-System sowie ein Mono-Kamerasystem zur Farbanalyse, deren Daten in einem gemeinsamen Belegungsgitter fusioniert werden. Der im Rahmen der occupancy-grids sonst übliche Ansatz der binären Bayes Filter (bsp. 0 = befahrbar, 1 = unbefahrbar) wurde durch die Evidenztheorie nach Dempster-Shafer ersetzt, um auch unbekannte Bereiche modellieren zu können, in denen keine oder nur unzuverlässige Messdaten vorliegen. Die Daten von Stereo-Visionssystem und Laserscannern werden genutzt, um eine dreidimensionale Höhenkarte vor dem Fahrzeug aufzubauen. Über geeignete Gradientenoperatoren lassen sich anschließend größere Sprünge im Geländeprofil detektieren und als unbefahrbar klassifizieren.

Das Mono-Kamerasystem analysiert das Farbprofil des bereits als befahrbar klassifizierten Bereiches vor dem Fahrzeug und markiert diejenigen Bildausschnitte, die einen ähnlichen Farbverlauf aufweisen [3]. Mit Hilfe der zuvor aufgebauten Höhenkarte lassen sich diese Kameradaten vom Bildraum zurück in das Fahrzeug-Koordinatensystem projizieren und so im Belegungsgitter eintragen. Die eigentliche Fusion der Daten erfolgt auf Merkmalsebene:

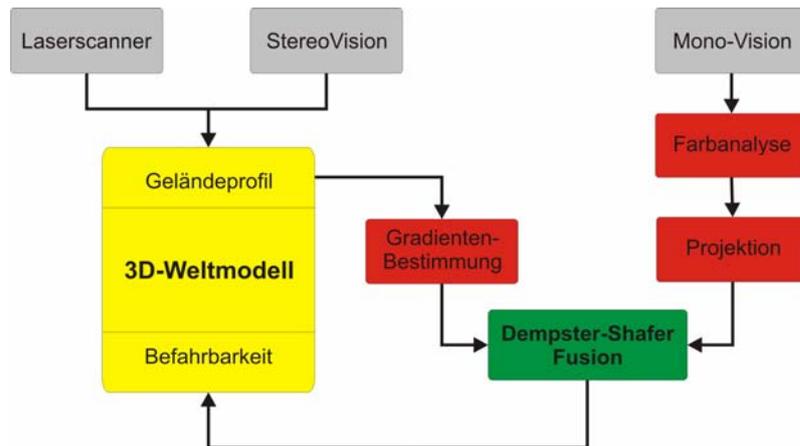


Abbildung 1: Gridfusion zur Fahrbereichsanalyse

Ein Dempster-Shafer Sensormodell ordnet jedem Messergebnis eine bestimmte Befahrbarkeit, Unbefahrbarkeit und Unbekanntheit im Rahmen der Wahrscheinlichkeits-Massenverteilung zu. Diese Daten lassen sich gemäß den Kombinationsgesetzen der Evidenztheorie auf einfache Art und Weise fusionieren. Im Ergebnis steht sowohl die Höhenkarte des Fahrzeugumfeldes als auch eine Klassifikation der einzelnen Zellen in die Gruppen befahrbar, unbefahrbar und unbekannt, auf deren Basis die weitere Fahrwegsplanung erfolgt. Durch die Fusion auf Merkmalsebene lassen sich effizient und ohne größeren Aufwand neue Sensortypen in den Ansatz integrieren, lediglich die Definition eines sensorspezifischen Dempster-Shafer Modells ist erforderlich. Das System wird im Rahmen der DARPA Urban Challenge im aufgebauten Versuchsfahrzeug erfolgreich in der Praxis eingesetzt und bildet zusammen mit einem klassischen objektorientierten Trackingsystem [4] die Basis der Umfelderkassung für diesen Versuchsträger.

Literatur:

- [1] Glenn Shafer; A Mathematical Theory of Evidence, Princeton University Press, 1976
- [2] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox; Probabilistic Robotics, The MIT Press, 2005
- [3] Sebastian Thrun, Mike Montemerlo, Hendrik Dahlkamp et al.; Stanley: The Robot that won the DARPA Grand Challenge; Stanford Artificial Intelligence Laboratory; Stanford University; Stanford; 2005
- [4] Jan Effertz; An Expandable Multi-Sensor Data-Fusion Concept for Autonomous Driving in Urban Environments; Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication; Vol. 4; 2007

Methoden zur hochgenauen Positionsbestimmung von Fahrzeugen im Bereich Fahrerassistenzsysteme durch Sensordatenfusion von GPS und weiterer Sensorik

Daniel Niehues

Institut für Verkehrstelematik
Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung
Technische Universität Dresden
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden
Tel: 0351/463-36784
Fax: 0351/463-36785

Schlüsselwörter: BMW TrackTrainer, GPS-Ortung, Visuelle Fahrspurerkennung, Digitale Karte, Kalmanfilter

Bei einer Reihe moderner Fahrerassistenzsysteme entscheidet die Güte der Positionsbestimmung über die Qualität, die Robustheit und den Einsatzbereich des Gesamtsystems. Verbesserungen in der Positionsbestimmung führen folglich zu einer besseren Performanz bzw. sind die Grundvoraussetzung für die Realisierung dieser Fahrerassistenzsysteme.

Ein Beispiel hierfür ist der BMW TrackTrainer ([1] und Abbildung 1). Dieser soll den "normalgeübten" Autofahrer beim schnellen Erlernen der Ideallinie auf Rennstrecken unterstützen. Dabei stellt das Gesamtsystem hohe Anforderungen an die Positionsbestimmung, von der eine Genauigkeit im cm-Bereich gefordert wird. Aktuell wird die Positions- und Ausrichtungsbestimmung durch die Koppelung von GPS und Inertialsensoren in einem Kalman Filter realisiert. Aufgrund verschiedener GPS-Empfangsbedingungen ist es mit dieser Sensorik nicht gewährleistet, dass zu jeder Zeit flächendeckend die geforderte maximale Positionsabweichung eingehalten werden kann.



Abbildung 1: BMW TrackTrainer

Im Rahmen dieses Vortrags wird zunächst der BMW TrackTrainer näher vorgestellt und Probleme der aktuellen Fahrzeugortung auf Rennstrecken erläutert. Weiterhin wird ein Ansatz aufgezeigt, wie die Qualität der Positions- und Ausrichtungsbestimmung auf Rennstrecken durch den Einsatz einer visuellen Spurerkennung in Verbindung mit einer hochgenauen digitalen Karte verbessert werden kann. Darüber hinaus werden Besonderheiten der Spurerkennung für hochdynamischen Fahrten, wie sie auf typischerweise auf Rennstrecken gefahren werden, aufgezeigt und diskutiert.

Ähnlich wie in [2] verwendet das vorgestellten Verfahren die Schätzung der eigenen Fahrzeugposition sowie das Vorwissen über die genaue Lage der Spurmarkierung aus einer digitalen Karte, um eine Region of Interest im Videobild (siehe Abbildung 2) zu berechnen.

$$\bar{x}_{welt} \rightarrow \bar{x}_{fzg} \rightarrow \bar{x}_{cam} \rightarrow \bar{u}_{cam}$$

Dadurch können Kantenoperatoren szenenspezifisch angepasst werden, was einerseits zu einer höheren Detektionsrate und andererseits zu einer geringeren Fehlinterpretationsrate führt. Weiterhin wird das Vorwissen des genauen Spurmarkierungsverlaufs und damit der zu erwartenden Krümmung für eine optimierte Parameterschätzung für das hinterlegte Straßenmodell verwendet.

Neben der eingesetzten Inertialsensorik bestehend aus drei Beschleunigungs- und drei Drehratensensoren liefern die im Fahrzeug verbauten Höhenstandssensoren eine zusätzliche Schätzung der Nick- und Wankbewegung des Fahrzeugs.

Die aus der visuellen Spurerkennung geschätzte Querablage sowie der relative Fahrbahnwinkel werden schließlich als

Messgrößen in einem Erweiterten Kalmanfilter für die Stützung der lateralen Fahrzeugposition sowie der Fahrzeugausrichtung verwendet.

Abschließend kann gezeigt werden, dass der zusätzliche Einsatz einer visuellen Spurerkennung in Verbindung mit einer hochgenauen Digitalen Karte zu einer Verbesserung der Positionsgenauigkeit bei schlechten GPS Bedingungen führt.

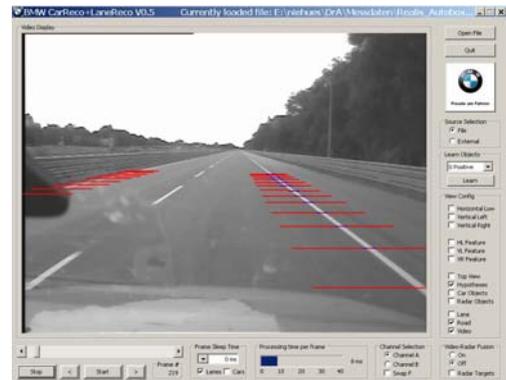


Abbildung 2: Spurprädiktion

Literatur:

- [1] BMW Group: *BMW TrackTrainer für die perfekte Linie.*, Pressemeldung 07.08.06
- [2] Scheunert, U., Cramer, H., Wanielik, G.: *Precise vehicle localization using multiple sensors and natural landmarks.* Proceedings of the Seventh International Conference on Information Fusion, pp. 649-656, The 7th International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28 to July 1, 2004.

Robuste Trajektorienplanung unter expliziter Berücksichtigung von nichtnormalverteilten Unsicherheiten durch Gaußsche Mischmodelle

N. Rossner T. Heine

Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik
Technische Universität Berlin
Sek. ER 2-1, Hardenbergstr. 36a, 10623 Berlin
Tel. 030 / 314 25160 Fax 030 / 314 21129
Thomas.Heine@TU-Berlin.de

Schlüsselwörter: Prozessplanung, Gaußsche Mischmodelle, Unscented Transformation

Bei der modellbasierten Planung von optimalen Prozessverläufen kommt der Voraussage zukünftiger Prozesszustände eine zentrale Rolle zu. Während die klassische Prozessplanung lediglich den nominellen Zustand prädiziert, konnte in vorangegangenen Arbeiten gezeigt werden [1], dass die Vorhersage von Normalverteilungen für geplante Prozesszustände zu weniger schwankenden Prozessergebnissen führt. Unter den verschiedenen Methoden zur Berechnung der zukünftigen Mittelwerte und Varianzen hat sich das so genannte Sigma-Punkt-Verfahren als sehr effizient erwiesen, da es ohne die aufwändige Berechnung von Ableitungen auskommt und dennoch ein Approximationsverfahren 2. Ordnung darstellt.

Bei stark nichtlinearen Systemmodellen weicht die Wahrscheinlichkeitsverteilung des zukünftigen Systemzustandes deutlich von einer Normalverteilung ab. Während Mittelwert und Varianz der Zustandskomponenten noch immer in guter Näherung wiedergegeben werden, verschieben sich andere Konfidenzbereiche, insbesondere bei Verteilungen großer Schiefe, erheblich. Durch eine Beschreibung der Unsicherheit über eine gewichtete Summe von Normalverteilungen, so genannte Gaußsche Mischmodelle, gelingt in diesem Fall eine wesentlich bessere Vorhersage über die statistischen Eigenschaften der Prozesszustände.

In diesem Beitrag soll neben der Funktionsweise der Unscented Transformation auch die Erweiterung auf Gaußsche Mischmodelle erläutert werden. Die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens wird in einer Simulationsstudie für ein biologisches Prozessmodell veranschaulicht, welches vereinfacht die Produktion eines Sekundärmetaboliten betrachtet. Das Modell zeichnet sich durch eine hohe Sensitivität gegenüber Schwankungen in den biotischen Anfangsbedingungen und in den Modellparametern aus, welche üblicherweise negative Auswirkungen auf die Produktivität haben.

Des Weiteren werden auch die Ergebnisse einer experimentellen Studie vorgestellt, in der auf dem mechanischen Versuchsstand ECP 220 der Firma Education Control Products eine Vielzahl zufällig gestörter Trajektorien realisiert wurde. Die Sigma-Punkt-Trajektorien berücksichtigen die Varianz der Störung bei der Planung und führen daher bei der experimentellen Realisierung zu geringeren Schwankungen im angesteuerten Sollwert.

[1] T. Heine, M. Kawohl, R. King. Ein neuer Ansatz zur robusten Trajektorienplanung und robusten nichtlinearen modellprädiktiven Regelung für Prozesse mit Parameterunsicherheiten. *at-Automatisierungstechnik*, 54:614–621, 2006.

Evaluierung von wahrscheinlichkeitstheoretischen Inferenzverfahren für dynamische Systeme

Marc-André Beyer

Regelungssysteme und Steuerungstechnik
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstr. 150
0234 – 32 24052
0234 – 32 14155
beyer@rus.rub.de

Prof. Dr.-Ing. Gunter Reinig

Regelungssysteme und Steuerungstechnik
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstr. 150
0234 – 32 24060
0234 – 32 14155
reinig@rus.rub.de

Schlüsselwörter: Zustands- und Parameterschätzung, Filterung, Bayes-Methoden, Nichtlineare Systeme, Evaluierung

Die wahrscheinlichkeitstheoretische Inferenz (WI) beschreibt das Problem, Informationen über die internen Variablen eines Systems, i.d.R. Zustände und/oder Parameter, aus unvollständigen und verrauschten Messdaten zu gewinnen. Anwendungsbeispiele von WI sind u.a. Filter für nichtlineare Regelungskonzepte, modellbasierte Fehlerdiagnose, Trägheitsnavigation u.v.m.. Wählt man einen statistischen, rekursiven Ansatz zur Lösung des WI-Problems, so ist diese durch die Rekursive Bayes'sche Schätztheorie gegeben, welche für die meisten praxisrelevanten Anwendungen nicht exakt lösbar ist. Das Spektrum an Näherungslösungen (z.B. Extended Kalman Filter, Unscented Kalman Filter, Partikel-Filter) ist in den letzten Jahren sehr umfangreich und unübersichtlich geworden. Die hohe Anzahl an Algorithmen und der Mangel an einer praxisorientierten Bewertungsmethodologie erschweren die Auswahl eines geeigneten Filters und inspirierten dieses Projekt.

Der wesentliche Grund für eine bisher vergleichsweise geringe Anwendungsbreite moderner Filterverfahren ist der Mangel an aussagekräftigen, praxisrelevanten und glaubwürdigen Informationen über die Möglichkeiten und Eigenheiten der Verfahren sowie einer benutzerfreundlichen Testumgebung zur Generierung quantifizierbarer Bewertungskriterien. In vorliegendem Beitrag wird ein Zugang vorgestellt, der dazu beitragen soll, den Entscheidungsprozess zu objektivieren. Der vorgeschlagene Ansatz sieht vor, praxisrelevante Merkmale gehobener Filterverfahren zu erheben, wobei sowohl quantitative als auch qualitative Merkmale bewertet werden. Basierend auf einer Literaturrecherche, intensiven Befragungen von Automatisierungstechnikern und den während dieses Projekts gesammelten Erfahrungen, wurde ein Kriterienkatalog zur Bewertung rekursiver Filter erarbeitet. Die Evaluierungskriterien berücksichtigen die maßgeblichen Gesichtspunkte, die während des Selektionsprozesses zu beachten sind, u.a. Filtergüte, Filterrobustheit,

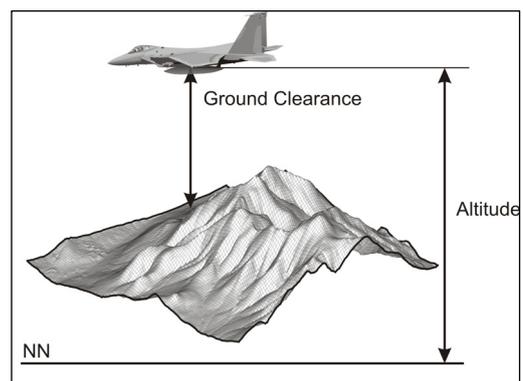


Abbildung 1: Terrain-Aided-Navigation

Filterrechenzeit, Anforderungen an den Anwender. Die anwendungsfreundliche Umsetzung der entwickelten Methodik erfolgte innerhalb einer neu entwickelten Matlab basierten Toolbox ReBEL-IoN, welche am Beispiel terrainbasierter Navigation (Terrain-Aided-Navigation, siehe Abbildung 1) vorgestellt wird.

Literatur:

- [1] S. Haykin. Kalman Filtering and neural networks. Wiley, New York, 2001
- [2] R. van der Merwe. Sigma-Point Kalman Filters for Probabilistic Inference in Dynamic State-Space Models, Phd thesis, OGI School of Science and Engineering at Oregon Health and Science University, 2004
- [3] A. Doucet, N. de Freitas, and N. Gordon. Sequential Monte Carlo Methods in Practice. Springer-Verlag, New York, 2001
- [4] B. Ristic, S. Arulampalam, and N. Gordon. Beyond the Kalman Filter. Artech House, 2004
- [5] P. Tichavsky, C.H. Muravchik, and A. Nehorai. Posterior Cramér-Rao Bound for Discrete-Time Nonlinear Filtering. IEEE Transactions on Signal Processing, 46(5):1386-1396, 1998
- [6] N. Bergmann. Recursive Bayesian Estimation; Navigation and Tracking Applications. Phd thesis no. 579, Department of Electrical Engineering. Linköping Studies in Science and Technology, 1999
- [7] N. Bergmann, L. Ljung, and F. Gustafsson. Terrain navigation using Bayesian statistics. IEEE Control Systems Magazine, 19(3):33-40, 1999
- [8] M.-A. Beyer and G.Reinig. Matlab basierte Toolbox ReBEL-IoN. <http://www.rebel-ion.de>

Sigma-Point Kalman Filter mit Nebenbedingungen

Dipl.-Ing. P. Schneider*

*Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA)
(Ltg. Prof. Dr.-Ing. habil. H. Janocha)
Universität des Saarlandes
66123 Saarbrücken
Tel.: +49 681 302-4649
Fax.: +49 681 302-2678
E-mail: p.schneider@lpa.uni-saarland.de

Schlüsselwörter: Nichtlineares Kalman Filter, Zustandsschätzung, Nebenbedingungen

Seit seiner Veröffentlichung [2] findet das Kalman Filter (KF) als Zustandsschätzer eine breite Verwendung. Das Filter ist einfach zu implementieren und liefert für lineare Systeme eine im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate (*least square error*) optimale Schätzung. Um die Vorteile des KF auch für nichtlineare Systeme zugänglich zu machen, wurde bis jetzt das so genannte Erweiterte Kalman Filter (EKF) angewendet. Dieses basiert auf der Linearisierung des Systems mit Hilfe einer Taylor-Reihenentwicklung und bietet somit eine suboptimale Schätzung. Damit liefert das EKF für Systeme mit signifikanten Nichtlinearitäten keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Seit einigen Jahren existieren weitere Modifikationen des KF, die sich gezielt mit der Anwendung auf nichtlineare Systeme beschäftigen. Diesen Modifikationen liegt die Tatsache zu Grunde, dass es einfacher ist eine Dichteverteilung anzunähern als eine nichtlineare Funktion. Bei der Schätzung der Dichteverteilung werden ausgewählte Punkte einer nichtlinearen Transformation unterworfen und dann ein gewichteter Mittelwert und eine gewichtete Varianz gebildet. Filter, die auf einem solchen Ansatz basieren, werden in [6] unter dem Begriff Sigma-Point Kalman Filter (SPKF) zusammengefasst. Zu dieser Gruppe von Filtern zählen das Unscented Kalman Filter (UKF) [1] und das Central Difference Filter (CDF) [4]. Diese Filter haben zusätzlich den Vorteil, dass bei der Realisierung nicht die Jakobi-Matrix gebildet werden muss, womit auch die Anwendung in Zusammenhang mit nicht stetig differenzierbaren Systemen möglich ist.

In vielen Anwendungen wird zunehmend versucht physikalische oder durch Planung vorgegebene Beschränkungen bei der Zustandsschätzung zu berücksichtigen, indem man diese in Nebenbedingungen (NB) zusammenzufasst und in die Implementierung einbindet. Eine Möglichkeit dies zu bewerkstelligen ist die Behandlung der NB als ideale Messung. Dieser Ansatz führt jedoch zu einer singulären Kovarianzmatrix und somit zu numerischen Problemen bei der Realisierung. Eine andere Möglichkeit wird in [5] und [3] vorgestellt. Sie basiert auf der Projektion der Schätzung in den durch die NB aufgespannten Raum und liefert in Zusammenhang mit linearem KF zufriedenstellende Ergebnisse.

In diesem Beitrag sollen nun anhand neuer Erkenntnisse die NB in die Implementierung der SPKF eingebunden werden. Dabei werden sowohl heuristische wie auch formale Ansätze verfolgt. Bei heuristischen Ansätzen wird versucht, die Dichteverteilung der Zufallsgrößen \mathbf{x} durch Änderung der Gewichtung und Verschiebung der Sigma-Punkte zu verändern. Die NB sollen in der ermittelten Dichteverteilung möglichst genau wiedergegeben werden. Erste Ansätze im Zusammenhang mit UKF wurden bereits in [7] veröffentlicht. Im Vortrag wird dieser Ansatz verbessert und auf CDF ausgeweitet. Die Methode findet ihre Anwendung, wenn die NB die Form $\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ besitzt, wobei \mathbf{b} hier einen konstanten Vektor bezeichnet. Bei den formalen Methoden bedient man sich dagegen der bereits vorher erwähnten Methode der Projektion in dem durch die NB aufgespannten Raum. Im Vortrag wird dieser Ansatz auch in Zusammenhang mit SPKF analysiert. Dabei wird insbesondere die Implementierung von nichtlinearen NB der Form $\mathbf{x} \leq \mathbf{b}(\mathbf{x})$ untersucht. Durch Approximation der nichtlinearen Funktion $\mathbf{b}(\mathbf{x})$ durch die Sterling-Interpolation, welche die Grundlage für das CDF bildet, wird eine deutliche Verbesserung der Schätzung erreicht. Es wird weiter gezeigt, dass die neuen Filter unter Berücksichtigung der NB auch dann eine gute Schätzung erzielen, wenn das EKF kein vernünftiges Ergebnis liefert.

Literatur:

- [1] Julier, S. J.: *The Scaled Unscented Transformation*. In: Proceedings of the American Control Conference 2 (2002), S. 4555–4559.
- [2] Kalman, R. E.: *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. In: ASME Journal of Basic Engineering 82 (1960) D, S. 35–45.
- [3] Ko, S.; Bitmead, R. R.: *State Estimation for Linear Systems with State Equality Constraints*. 16th IFAC World Congress, Prague, 2005.
- [4] Norgaard, M.; Poulsen, N.: *New Development in State Estimation for Nonlinear Systems*. In: Automatica 36 (2000), S. 1627–1638.
- [5] Simon, D.; Chia, T.: *Kalman Filtering with State Equality Constraints*. In: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 39 (2002), S. 128–136.
- [6] v. d. Merwe, R.: *Sigma-Point Kalman Filters for Probabilistic Inference in Dynamic State-Space Models*. Dissertation, Oregon University, 2004.
- [7] Weickert, T.; Haschka, M.: *Advanced Sigma Point Placement for the Unscented Kalman Filter*. Reports on Industrial Information Technology, Ausgabe 9, 2006.

Flachheitsbasierte Zwei-Freiheitsgrade-Regelung von Speicherwasserkraftwerken

Michael Treuer *

* Institut für Verfahrenstechnik und
Dampfkesselwesen (IVD)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 23
0711 685 66208
0711 685 66590
michael.treuer@ivd.uni-stuttgart.de

Ernst Welfonder **

** Institut für Verfahrenstechnik und
Dampfkesselwesen (IVD)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 23
0711 685 66214
0711 685 66590
ernst.welfonder@ivd.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Flachheit, Trajektorienplanung, Zwei-Freiheitsgrade-Regelung, Wasserkraftwerk

Speicherwasserkraftwerke beteiligen sich zu einem sehr hohen Grad an der Netzregelung. Dazu müssen sie in der Lage sein, möglichst schnell große Lastbereiche zu durchfahren. Wasserkraftwerke sind mit möglichen Leistungsgradienten von bis zu 100% in unter 80 Sekunden bereits sehr schnell im Vergleich zu konventionellen Dampfkraftwerksblöcken. Ein begrenzender Faktor für die Leistungsgradienten sind allerdings die während eines Arbeitspunktwechsels auftretenden Druckstöße im Druckstollen, die zudem stark materialbelastend sind. Ein weiterer Nachteil der derzeit praktizierten rampenförmigen Sollwertvorgabe besteht darin, dass die physikalischen Eigenschaften der Anlage, wie z.B. die zu einem Falschregleffekt führende Nichtminimalphasigkeit, nicht berücksichtigt werden [1].

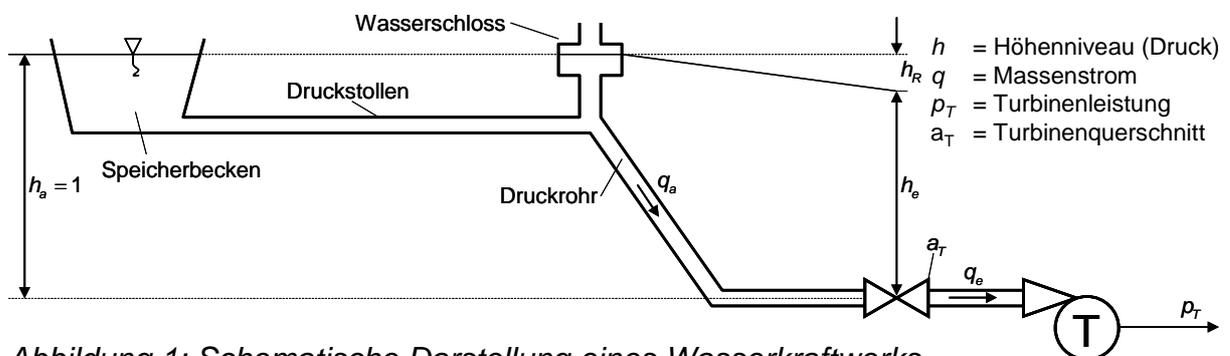


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Wasserkraftwerks

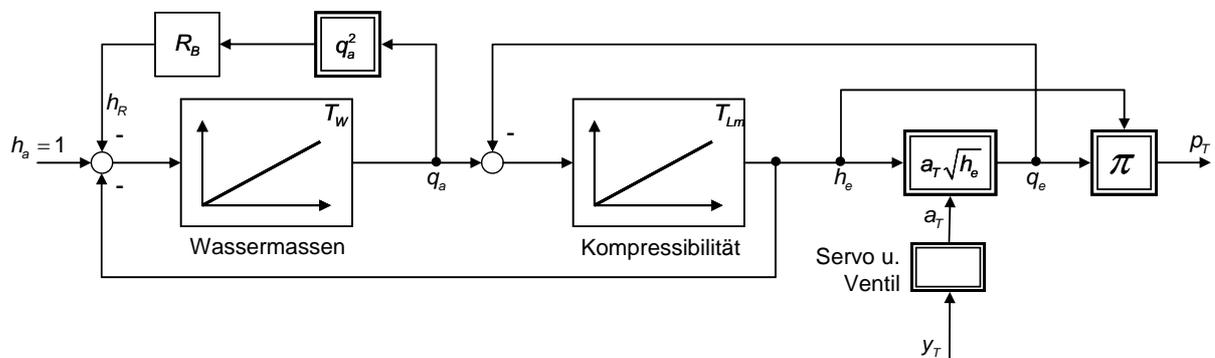


Abbildung 2: Vereinfachtes Blockschaltbild des Wasserkraftwerksmodells

Abbildung 2 veranschaulicht die Modellierung des in Abbildung 1 schematisch dargestellten Speicherwasserkraftwerks. Dieses Modell besitzt auch bei Einbeziehung der Stellgliederdynamik die Systemeigenschaft der differentiellen Flachheit [2]. Diese erlaubt den Entwurf einer Vorsteuerung, die die Systemdynamik berücksichtigt [3]. Durch eine geeignete Trajektorienwahl ist es möglich, den Druckverlauf während des Arbeitspunktwechsels gezielt zu beeinflussen und damit Druckstöße zu begrenzen und Druckschwingungen zu vermeiden [4]. Dabei kann, unter der Vorgabe die gewünschte Zielleistung in der gleichen Zeit zu erreichen wie bisher, die Materialbelastung erheblich reduziert werden, d.h. eine schonendere Fahrweise bei gleich bleibender Performance wird ermöglicht. Alternativ ist bei gleicher Materialbelastung durch die Druckstöße eine schnellere Fahrweise möglich. Da die flachheitsbasierte Vorsteuerung aus rein algebraischen Gleichungen besteht, ist eine leittechnische Umsetzung relativ einfach möglich. Änderungen des bestehenden Regelkonzepts in der Leittechnik betreffen nur die Sollwertführung und die Vorsteuerung. Vorhandene und bereits optimierte Turbinenregler können unverändert bestehen bleiben.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Konzept für eine flachheitsbasiertes Zwei-Freiheitsgrade-Regelung für ein Speicherwasserkraftwerk vorgestellt. Durch Simulationen werden die Vorzüge dieses Verfahrens veranschaulicht und die Robustheit des Ansatzes gegenüber Parameterunsicherheiten sowie nicht modellierten Dynamiken belegt. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf dem Entwurf und Vergleich verschiedener Trajektorien insbesondere auf Basis täglicher betriebsorientierter Anforderungen.

Literatur:

- [1] M. Hoppe. „Die Regelung von Systemen mit Allpaß-Verhalten – dargestellt durch theoretische und experimentelle Untersuchung einer Wasserkraftanlage.“ *Schriftenreihe des Lehrstuhls für Meß- und Regelungstechnik*. Ruhr-Universität Bochum, Nr.16, 1981.
- [2] M. Fliess, J. Lévine, Ph. Martin, and P. Rouchon. „Flatness and defect of nonlinear systems: introductory theory and examples“. *Int. J. Control*, 61(6):1327–1361, 1995.
- [3] V. Hagenmeyer, and M. Zeitz. „Flachheitsbasierter Entwurf von linearen und nichtlinearen Vorsteuerungen“, *at – Automatisierungstechnik*, 52 (2004), 3–12
- [4] M. Treuer, T. Weißbach, M. Kurth, and V. Hagenmeyer. „Flatness-based two-degree-of-freedom control of a pumped storage power station.“ *In Proceedings of the European Control Conference*, Kos, Greece, 4087–4094, July 2007.

Verfahren zum Entwurf einer robusten Regelung mit flachheitsbasierter Vorsteuerung

Daniel Zirkel

Robert Bosch GmbH
Gasoline Systems
GS/ENA3
Postfach 30 02 40
70442 Stuttgart
Tel.: 0711 – 811 42704
Fax: 0711 – 811 8515
daniel.zirkel@de.bosch.com

Steven Liu

Lehrstuhl für Regelungssysteme
Technische Universität
Kaiserslautern
Erwin-Schrödinger-Str. 12/332
67663 Kaiserslautern
Tel.: 0631 – 205 4535
Fax: 0631 – 205 4205
sliu@eit.uni-kl.de

Gunter Wiedemann

Robert Bosch GmbH
Gasoline Systems
GS/ENA3
Postfach 30 02 40
70442 Stuttgart
Tel.: 0711 – 811 24237
Fax: 0711 – 811 8515
gunter.wiedemann@de.bosch.com

Schlüsselwörter: Flachheitsbasierte Regelung, Streckenunsicherheiten, Robuste Regelung

Fliess, Lévine, Martin und Rouchon führten 1992 das Konzept der Flachheit ein [1], welches auch für eine Klasse von nichtlinearen Systemen zum Entwurf von Steuerungen und Regelungen zur Trajektorienfolge herangezogen werden kann [2], [3]. In der Anwendung wurde oft davon Gebrauch gemacht, dass flache Systeme mit einer quasi-statischen Zustandsrückführung exakt

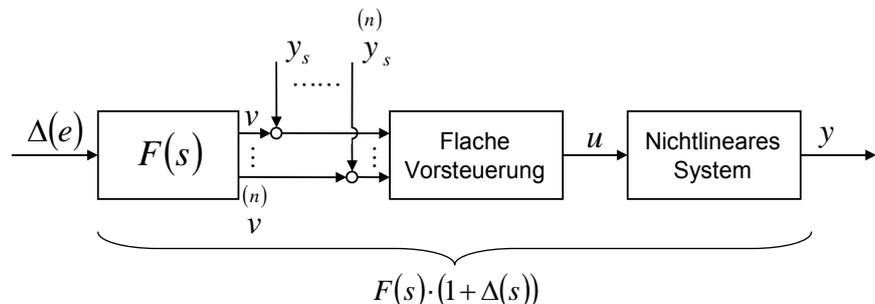


Abbildung 1: Struktur der zu regelnden Strecke eines SISO-Systems

linearisiert werden können (z.B. in [2], [4]). Dem Vorteil, lineare Entwurfswerkzeuge benutzen zu können, steht aber der Nachteil gegenüber, dass aufgrund von Parameterunsicherheiten und unbekannten Störungen die Linearisierung häufig nicht exakt ist und dem so entworfenen Regler möglicherweise die Robustheit fehlt.

Im Jahre 2003 stellte Hagenmeyer das Konzept der exakten Linearisierung durch Vorsteuerung [5] vor, welches explizit die nichtlineare Folgefehlerdynamik von flacher Vorsteuerung mit nichtlinearer Strecke betrachtet. Dieses Konzept ermöglicht prinzipiell einen Reglerentwurf, welcher Parameterunsicherheiten und Störungen mit berücksichtigt. Nachteil dieses Entwurfs ist die Verwendung der von den Solltrajektorien abhängigen, nichtlinearen, erweiterten PID-Regler.

Für den hier vorgestellten robusten Regelungsansatz wird ebenfalls die flache Vorsteuerung zur Inversion der nichtlinearen Strecke und damit zur Kompensation der Nichtlinearitäten verwendet. Dabei wird das Reglerausgangssignal mit seinen Ableitungen, welche durch ein lineares Filter $F(s)$ (z.B. ein PT_n -Glied) erzeugt werden, auf die entsprechenden Solltrajektorien addiert (siehe *Abbildung 1*). Damit ist es möglich, der Fehlerdynamik im geforderten Arbeitsbereich ein lineares, dominierendes Verhalten aufzuprägen.

Die Vorteile dieses Ansatzes liegen zum einen in der Benutzung linearer Entwurfsmethoden für den Regler und zum anderen die Möglichkeit einer expliziten

Berücksichtigung von Parameterunsicherheiten und Störungen beim Reglerentwurf. Als Entwurfsmethodik bietet sich beispielsweise die H_∞ -Regelung an, obwohl auch andere Syntheseverfahren prinzipiell angewendet werden können.

Zur Modellierung von $\Delta(s)$ wird die Verschaltung von flacher Vorsteuerung und nichtlinearer Strecke entlang einer Trajektorie linearisiert. Anschließend wird ein H_∞ -Regler entworfen, welcher für die gegebene Unsicherheit $\Delta(s)$ eine robuste Stabilität garantiert.

Die gesamte Vorgehensweise wird am Beispiel einer Regelung des Luftpfades eines Brennstoffzellen-Systems, bestehend aus einer Verschaltung von Drossel-Volumen-Elementen, dargestellt.

Es wird weiterhin gezeigt, dass obige Struktur äquivalent zu einer exakten Zustandslinearisierung mit Beobachter ohne Rückführung ist.

Abschließend erfolgt ein Vergleich des obigen Ansatzes mit bereits bekannten Methoden der flachheitsbasierten Regelung wie der exakten Linearisierung durch Vorsteuerung [5], der flachheitsbasierten IMC-Regelung [6] und der robusten Folgeregelung nach Zerar, Cazaurang und Zolghadri [7].

Literatur:

- [1] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon: On differentially flat nonlinear systems. In M. Fliess (Editor), *Nonlinear Control Systems Design*, pp. 408-412, Pergamon Press, 1992.
- [2] R. Rothfuß, J. Rudolph, M. Zeitz: Flachheit: Ein neuer Zugang zur Steuerung und Regelung nichtlinearer Systeme. *at – Automatisierungstechnik* 45 (1997), S. 517-525
- [3] V. Hagemeyer, M. Zeitz: Flachheitsbasierter Entwurf von linearen und nichtlinearen Vorsteuerungen. *at – Automatisierungstechnik* 52 (2004), S. 3 – 12
- [4] V. Hagenmeyer, P. Kohlrausch, E. Delaleau: Flatness based control of the separately excited DC drive. In A. Isidori, F. Lamnabhi-Lagarrigue & W. Respondek, *Nonlinear Control in the Year 2000*, volume 1, pp. 439-451, Springer, London, 2000
- [5] V. Hagenmeyer: Robust nonlinear tracking control based on differential flatness, *Fortschr.-Ber. Nr. 8/978*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [6] D. Schwarzmann, J. Lunze, R. Nitsche: A Flatness-Based Approach to Internal Model Control. In *Proc. American Control Conference ACC 2006*, Minneapolis, Minnesota, USA, S. 5666-5671
- [7] M. Zerar, F. Cazaurang, A. Zolghadri: Robust tracking of nonlinear MIMO uncertain flat systems. In *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics 2004*, Hague, Netherlands, pp. 536-541

Vollständige Modale Synthese linearer verteilt-parametrischer Systeme

Joachim Deutscher

Lehrstuhl für Regelungstechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstraße 7, D-91058 Erlangen
Tel.: (09131) 85-27128
Fax: (09131) 85-28715

E-Mail: joachim.deutscher@rt.eei.uni-erlangen.de

Schlüsselwörter: lineare verteilt-parametrische Systeme, Zustandsrückführung, Eigenwertvorgabe, Riesz-Spektraloperatoren, Führungsentkopplung

Die Eigenwertvorgabe für lineare zeitinvariante Systeme ist eine grundlegende Problemstellung der Regelungstheorie. Bei linearen Systemen mit konzentrierten Parametern führt diese Aufgabenstellung im Mehrgrößenfall auf ein nichtlineares unterbestimmtes Gleichungssystem, welches für steuerbare Systeme unendlich viele Lösungen besitzt (siehe z. B. [3]). In [4] wurde durch Einführung der Vollständigen Modalen Synthese eine explizite Lösung dieses Eigenwertvorgabeproblems in parametrischer Form angegeben. Als frei wählbare Entwurfparameter werden hierbei nicht die Elemente der Rückführmatrix, sondern die Regelungseigenwerte und die zugehörigen Parametervektoren verwendet. Letztere Entwurfsgrößen parametrieren die nach der Eigenwertvorgabe noch vorhandenen Freiheitsgrade. Darüber hinaus ist es möglich, nach Vorgabe der Eigenwerte die Eigenvektoren der Regelung durch Vorgabe der Parametervektoren im Rahmen der verfügbaren Freiheitsgrade zu beeinflussen.

Bei linearen verteilt-parametrischen Systemen mit verteiltem Eingriff, für die ein Eigenwertvorgabeentwurf möglich ist, beschränken sich die Arbeiten meist auf Systeme mit einer Eingangsgröße (siehe z. B. [1;5]). Eine Erweiterung des Polvorgabeentwurfs auf verteilt-parametrische Mehrgrößensysteme ist jedoch prinzipiell mit Hilfe des early-lumping-Ansatzes möglich. Ausgangspunkt dieser Methode ist eine endlichdimensionale Approximation der Strecke, für die sich mit Hilfe der Vollständigen Modalen Synthese das Eigenwertvorgabeproblem lösen lässt. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass aufgrund der Streckenapproximation kein Zusammenhang zwischen den Parametervektoren und den Systemgrößen des verteilt-parametrischen Systems hergestellt werden kann.

In diesem Beitrag wird eine Lösung des Eigenwertvorgabeproblems für parabolische Mehrgrößensysteme mittels eines late-lumping-Ansatzes vorgestellt, bei dem der Regler ohne Approximation der Strecke bestimmt wird. Als ortsabhängige Gewichtsfunktion in der Zustandsrückführung wird eine endliche Reihe in den Streckeneigenfunktionen angesetzt, womit sich gezielt nur endlich viele Eigenwerte der Strecke verschieben lassen. Für die Entwicklungskoeffizienten dieser Gewichtsfunktion lässt sich ein expliziter Formelausdruck in parametrischer Form herleiten. Als Entwurfparameter werden hierfür wie bei der Vollständigen Modalen Synthese für endlichdimensionale Systeme die Regelungseigenwerte und die Parametervektoren verwendet. Es stellt sich dabei heraus, dass sich nach der Eigenwertvorgabe die Eigenfunktionen der Regelung durch die Wahl der

Parametervektoren im Rahmen der vorhandenen Freiheitsgrade beeinflussen lassen. Folglich kann mittels der vorgeschlagenen Parametrierungsformel die Modalstruktur der Regelung festgelegt werden, weshalb dieses Entwurfsverfahren als Vollständige Modale Synthese für lineare verteilt-parametrische Systeme bezeichnet wird. Um die Regelungseigenfunktionen zur Reglersynthese heranziehen zu können, müssen sie eine Basis im unendlichdimensionalen Zustandsraum des verteilt-parametrischen Systems bilden. Diese Eigenschaft lässt sich stets durch geeignete Wahl der Parametervektoren sicherstellen. Hierzu wird im Vortrag diskutiert, unter welchen Voraussetzungen die Eigenfunktionen der Regelung eine Riesz-Basis bilden (siehe z. B. [2]). Ferner wird gezeigt, dass dann der Ortsoperator der Regelung ein Riesz-Spektraloperator ist (siehe z. B. [2]). Für solche Operatoren ist bekannt, dass die exponentielle Stabilität des Systems mit Hilfe des Eigenwertkriteriums wie im endlichdimensionalen Fall untersucht werden kann.

Meistens geht man beim Entwurf verteilt-parametrischer Systeme von einer Systemdarstellung in den Modalkoordinaten der Strecke aus. Bei manchen Problemstellungen ist es jedoch vorteilhaft, den Reglerentwurf in den Modalkoordinaten der Regelung durchzuführen. Für diesen Fall erweist sich die Vollständige Modale Synthese für verteilt-parametrische Systeme als adäquates Entwurfswerkzeug, da sich mit ihr die Regelungseigenfunktionen und damit die Basisfunktionen der Systembeschreibung beim Reglerentwurf festlegen lassen. Diese Zusammenhänge werden anhand der teilweisen Führungsentkopplung eines parabolischen Mehrgrößensystems verdeutlicht. Durch einen Vergleich mit dem early-lumping-Ansatz werden anhand dieses Beispiels die Vorteile der vorgeschlagenen Vollständigen Modalen Synthese von linearen verteilt-parametrischen Systemen diskutiert.

Literatur:

- [1] *Bradshaw, A. und Porter, B.:* Modal control of a class of distributed-parameter systems: multi-eigenvalue assignment. *Int. J. Control* 16 (1972), S. 277 – 285.
- [2] *Curtain, R.F. und Zwart, H.J.:* An introduction to infinite-dimensional linear system theory. *Texts in Applied Mathematics* 21, Springer-Verlag, New York, 1995.
- [3] *Föllinger, O.:* Regelungstechnik. Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 1994.
- [4] *Roppenecker, G.:* Polvorgabe durch Zustandsrückführung. *Regelungstechnik* 29 (1981), S. 228 – 233.
- [5] *Wang, P.K.C.:* Modal feedback stabilization of a linear distributed system. *Trans. Aut. Control* 17 (1972), S. 552 – 553.

Modellierung der dynamischen Eigenschaften von Wärmeübertragern in Biomassefeuerungen

Markus Gölles *

* Institut für Regelungs- und
Automatisierungstechnik
Technische Universität Graz
Kopernikusgasse 24/II
8010 Graz, Österreich
Tel.: ++43 316 873 9208
Fax: ++43 316 873 7028

E-Mail: markus.goelles@abc-energy.at

Robert Bauer **

** Institut für Regelungs- und
Automatisierungstechnik
Technische Universität Graz
Kopernikusgasse 24/II
8010 Graz, Österreich
Tel.: ++43 316 873 7036
Fax: ++43 316 873 7028

E-Mail: robert.bauer@tugraz.at

Schlüsselwörter: Biomassefeuerung, Wärmeübertrager, Modellbildung

Im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen handelt es sich bei Biomasse (Hackgut, Sägemehl, Rinde, usw.) um einen CO₂-neutralen Energieträger. Aufgrund steigender Bemühungen zur Reduktion der CO₂-Emissionen gewinnt die Energieerzeugung durch Verbrennung von Biomasse somit eine besondere Bedeutung.

Zur weiteren Nutzung der bei der Verbrennung freigesetzten Wärme (Prozesswärme, Heizung, Stromerzeugung) wird diese in Wärmeübertragern auf einen anderen Fluidstrom (üblicherweise Wasser) übertragen. Um die Wärmeübertrager geeignet betreiben zu können, ist es hilfreich, die dynamischen Eigenschaften des Wärmeübertragers zu kennen.

Im Rahmen des Vortrages wird ein einfacher und flexibler Ansatz zur Beschreibung der dynamischen Eigenschaften von Wärmeübertragern anhand eines sogenannten Rohrbündel-Wärmeübertragers vorgestellt. Dabei wird von einer allgemeinen Beschreibung der Wärmeübertragung in einem durchströmten Rohr [4] ausgegangen. Unter Berücksichtigung der besonderen Verhältnisse im Rauchgas- und im Wasserstrom ([1],[2]) ergeben sich partielle Differentialgleichungen, die die Temperatur als Funktion von Ort und Zeit für den Rauchgas- und den Wasserstrom beschreiben.

Allerdings zeigen die Simulationsergebnisse bei sprungförmigen Änderungen diverser Prozessgrößen, dass das dynamische Verhalten des Wärmeübertragers letztendlich durch ein nichtlineares Modell erster Ordnung zufriedenstellend beschrieben werden kann. Die Verifikation des entwickelten neuen Modells mit Messdaten einer Versuchsanlage des Austrian Bioenergy Centre (Rostfeuerung mit einer thermischen Nennleistung von 180kW; Rohrbündelwärmeübertrager mit drei Rauchgaszügen) zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten.

Aufgrund des verwendeten allgemeinen Ansatzes zur Modellherleitung ist zu erwarten, dass relativ einfache Adaptierungen auch zu zufriedenstellenden Modellen für andere Bauformen führen, und der Einsatz des vorgestellten Modells somit nicht nur auf Rohrbündelwärmeübertrager beschränkt ist.

Das vorgestellte Modell kann unter anderem als Grundlage für eine modellbasierte Regelung sowie zur Abschätzung nicht gemessener Größen [3] bzw. des Verschmutzungsgrades des Wärmeübertragers verwendet werden.

Literatur:

- [1] H.D. Baehr: *Thermodynamik*, Springer Verlag, 12. Auflage (2005)
- [2] H.D. Baehr, K. Stephan: *Wärme- und Stoffübertragung*, Springer Verlag, 5. Auflage (2005)
- [3] R. Bauer, M. Göllés, T. Brunner, N. Dourdoumas, I. Obernberger: *Was messen Temperatursensoren in Biomassefeuerungsanlagen wirklich?*, angenommen zur Veröffentlichung bei at – Automatisierungstechnik
- [4] L.A. Gould: *CHEMICAL PROCESS CONTROL: THEORY AND APPLICATIONS*, Addison Wesley Longman Publishing Co, (2005)

Entwicklung eines reduzierten Finite Elemente-Grundwassermodells für ein modellprädiktives Entscheidungshilfesystem

Oliver Krol / Thomas Bernard

Fraunhofer-Institut für Informations-
und Datenverarbeitung IITB
Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 721 6091 430 / - 360
Fax +49 721 6091 413
{oliver.krol, thomas.bernard}@iitb.fraunhofer.de

Die sehr dynamische wirtschaftliche Entwicklung in den Megapolis Chinas hat in den letzten Jahrzehnten zu einer intensiven Nutzung der Ressource Wasser geführt. Damit auch die Wasserversorgung in den kommenden Generationen gesichert bleibt, sind nachhaltige Strategien bei der Ressourcennutzung von essentieller Bedeutung. In einem deutsch-chinesischen Forschungsprojekt wird zur Zeit ein Entscheidungshilfesystem zum Management der Wasserressourcen der Region Peking entwickelt und implementiert, dessen Grundstruktur in Abbildung 1 gezeigt ist [1]. Im vorliegenden Beitrag sollen nur zwei Aspekte dieses Management-Systems vorgestellt werden, die sich mit der Entwicklung des Grundwasser-Modells und dessen Reduktion befassen.

Da ein erheblicher Anteil an den zu verteilenden Wasserressourcen aus dem Grundwasser entnommen werden, ist die Güte des Grundwassermodells von herausragender Bedeutung für das zu entwickelnde Management-System. Das Grundwasserverhalten wird als schleichende Strömung angenommen und somit durch die Diffusionsgleichung (1) mathematisch beschrieben [2]. Diese partielle Differentialgleichung wird mittels der Finiten Elemente Methode (FEM) numerisch gelöst.

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (k_f \nabla h) = Q_{zu} - Q_{ab}. \quad (1)$$

Für eine möglichst realistische Beschreibung des Grundwassersystems müssen die zeit- und ortsabhängigen Quellen Q_{zu} und Senken Q_{ab} (d. h. Grundwasserentnahme und Grundwasserneubildung) für das 6.300 km² umfassende Grundwassermodell sinnvoll abgeschätzt werden. Hierzu werden neben den Niederschlägen und dem antropogenen Verbrauch durch Industrie, Landwirtschaft (Bewässerung) und private Haushalte auch Effekte wie Evapotranspiration (Verdunstung von Wasser aus der Tier- und Pflanzenwelt) berücksichtigt [3]. Dies sind die wesentlichen Einflussfaktoren für die effektive Grundwasserneubildung ($Q_{zu} - Q_{ab}$) und somit für das Regenerationsvermögen der Grundwasserressourcen.

Mittels Optimierung sollen die Wasserressourcen derart auf die genannten Verbrauchergruppen aufgeteilt werden, dass eine möglichst nachhaltige Wasserversorgung sichergestellt ist, die sich mittelfristig in einer Stabilisierung und langfristig in einem Anstieg des Grundwasserpegels niederschlägt. Zur Entwicklung von Optimierungsstrategien sind jedoch die hochdimensionalen FEM-Modelle aufgrund einer Knotenanzahl von ca. 200.000 in der Regel zu rechenintensiv. Daher muss das

FEM-Modell, das als Ein-/Ausgangsmodell mit 13 Eingängen und 12 Ausgängen abgebildet wird, zu einem Zustandsraum-Modell relativ niedriger Ordnung ($n < 50$) reduziert werden. Da gegenwärtig keine Modellreduktionsverfahren verfügbar sind, die sowohl auf hochdimensionale FEM-Modelle als auch auf Modelle mit mehreren Eingängen anwendbar sind [4], wurde ein trajektorienbasiertes Modellreduktionskonzept entwickelt und untersucht. Die Grundidee dieses Konzeptes besteht darin, die räumlich verteilte Information des Systems über Referenzszenarien vorzusimulieren und abzuspeichern, so dass nur kleine Abweichungen von diesen Referenzszenarien modelliert werden müssen (vgl. [5]). Dabei werden mittels geeigneter Test-Eingangdaten und Modellansätze SISO-Modelle für jedes Ein-/Ausgangsverhalten identifiziert. Danach werden die Modelle weiter mittels konventioneller Reduktionsverfahren (z. B. Balanced Truncation) reduziert und schließlich zu einem Zustandsraum-Modell zusammengeführt.

Das beschriebene Konzept wird zur Modellreduktion des komplexen Grundwassersystems der Region Peking angewandt und bietet die Möglichkeit, einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Größe des Modells einzustellen. Die Leistungsfähigkeit des implementierten Konzeptes wird anhand von Ergebnissen aus einem Optimierungsszenario nachgewiesen. Weiter wird gezeigt, dass das reduzierte Grundwassermodell eine sehr gute Approximation des vollen FEM-Modells darstellt.

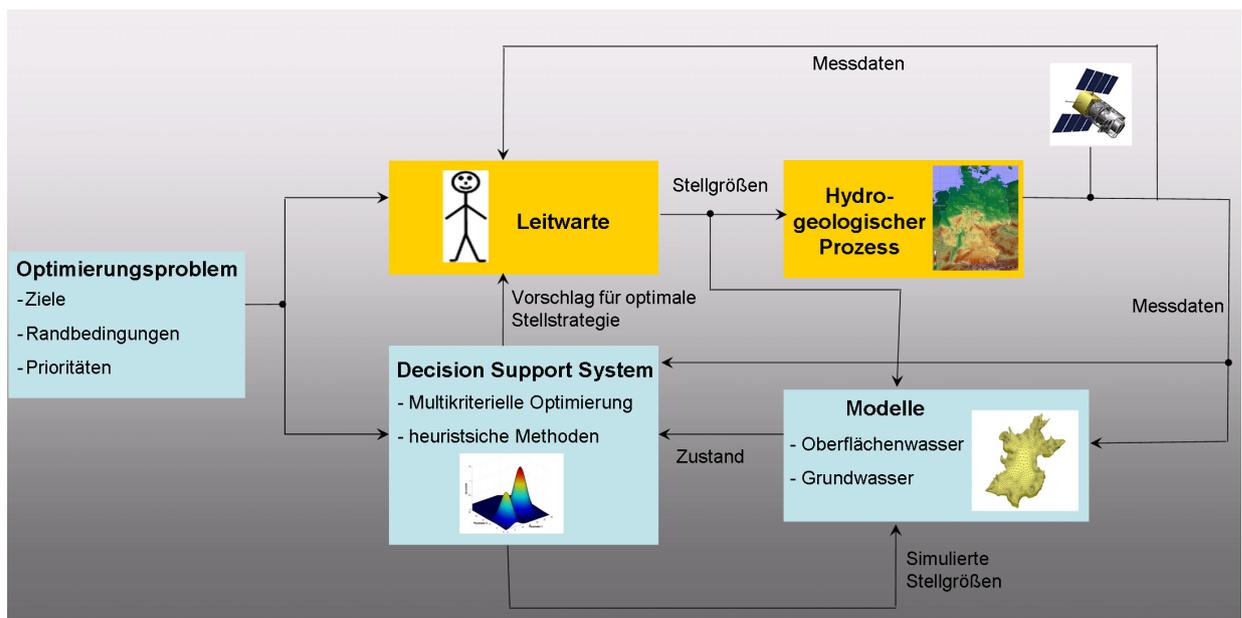


Abbildung 1: Grundstruktur des Wasser-Management-Systems

Literatur:

- [1] Bernard, T., Linke, H., Krol, O.: A Concept for the long term Optimization of regional Water Supply Systems using a reduced Finite Element Groundwater Model. VDI/VDE GMA-Kongress 2007, VDI-Berichte 1980, pp. 751-762, Baden-Baden (Germany), 12./13.6.2007
- [2] B.Hölting W.G.Coldewey: Hydrogeologie – Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie, 6. Auflage, Elsevier GmbH Spektrum Akademischer Verlag, München, 2005
- [3] J. Bear: Dynamic of Fluids in Porous Media, Dover Publications, Inc., New York, USA, 1988
- [4] A. C. Antoulas: Approximation of Large-Scale Dynamical Systems. Philadelphia: SIAM Press, 2005
- [5] P. Wolfrum, A. Vargas, M. Gallivan, F. Allgöwer: Complexity reduction of a thin film deposition model using a trajectory based nonlinear model reduction technique. American Control Conference, Portland, USA, 2005

Modellierung der gekoppelten Regelkreise der Nahreaktion des menschlichen Auges

Simon Klink *

Georg Bretthauer **

* Institut für Angewandte Informatik
 Forschungszentrum Karlsruhe
 Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
 07247 82 5780
 07247 82 2602
 Simon.Klink@iai.fzk.de

** Institut für Angewandte Informatik
 Forschungszentrum Karlsruhe
 Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
 07247 82 5700
 07247 82 5702
 Georg.Bretthauer@iai.fzk.de

Schlüsselwörter: Auge, Akkommodation, Vergenz, Totzeit, Modellbildung

Die Fähigkeit des menschlichen Auges, auf Objekte in unterschiedlicher Distanz zu fokussieren (Akkommodation) geht mit dem Alter stark zurück und findet nach einer Operation des Grauen Stars (Katarakt) nicht mehr statt. Ein mechatronisches Implantat, welches diese Funktion im Alter übernimmt, ist deshalb von großem Nutzen für die Lebensqualität von Menschen einer alternden Gesellschaft. Ein solches Implantat muss Informationen über den Akkommodationsbedarf beziehen und greift dann in die gekoppelten Regelkreise der Nahreaktion ein (Abb. 1). Um die Folgen eines Eingriffes vorhersagen zu können, ist das Verständnis über die Regelkreise, insbesondere über die enge Verbindung zwischen Akkommodation und Vergenz (entgegengesetzte Rotation der Augäpfel), erforderlich.

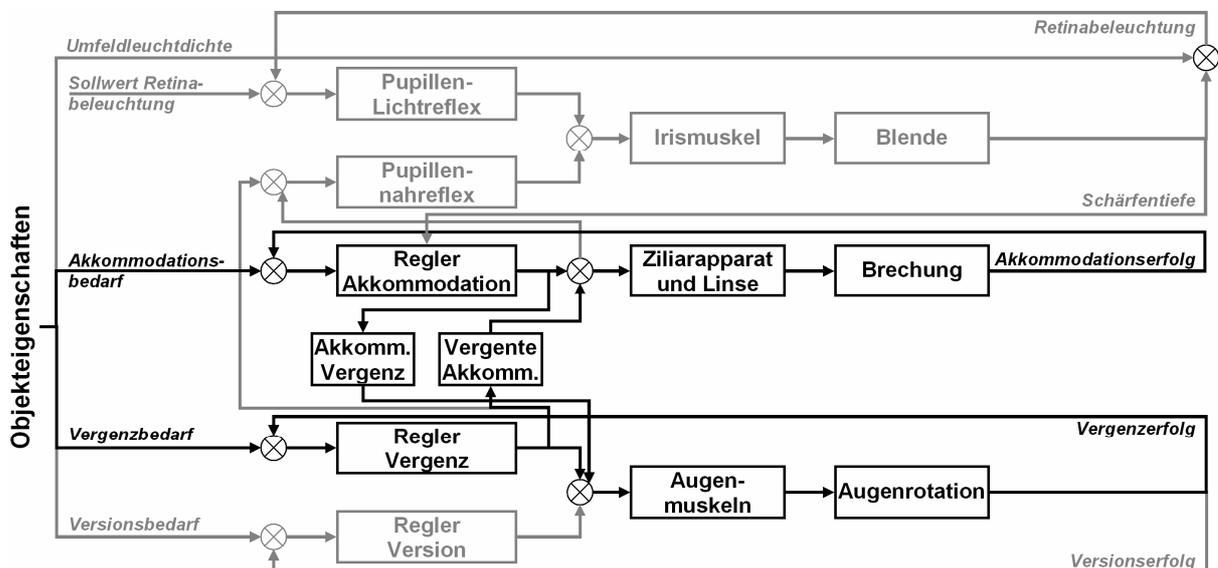


Abbildung 1: Struktur der vielfach gekoppelten Regelkreise der Nahreaktion

Da weder für das Gesamtsystem noch für die Einzelkomponenten plausible Regelkreise existieren [1], wird der gekoppelte Regelkreis aus Vergenz und Akkommodation modelliert. Das Eingangs-Ausgangsverhalten der Regelkreise ist weitestgehend sowohl im gekoppelten als auch im teilweise entkoppelten Zustand bekannt und kann in guter Näherung durch eine Totzeit und eine Zeitkonstante beschrieben werden. Die statischen Eigenschaften lassen sich mit Hilfe einer

Ruhelage, einer minimal detektierbaren Regelabweichung, einer Verstärkung von knapp Eins und einer Beschränkung der Ausgangsgröße beschreiben.

Auch das Verhalten der Regelstrecken ist weitestgehend bekannt. Die Eigenschaften der an der Akkommodation beteiligten Gewebearten lassen auf eine Sättigungsfunktion mit altersabhängiger Amplitude und ein PT_1 -Glied mit altersabhängiger Verzögerung schließen [2], die Augenbewegung lässt sich als PT_2 -Glied beschreiben.

Mit Hilfe des Gesamtverhaltens und der Streckeneigenschaften kann nun auf die Reglereigenschaften geschlossen werden. Bisherige Entwürfe geschlossener Regelkreise konnten vor allem die Kombination aus Totzeit, großer Verstärkung und kleiner Zeitkonstante nicht realisieren. Dieses Problem lässt sich jedoch mit einer Totzeit im Regler in Verbindung mit einer internen Rückführung lösen. Um einen einfachen Regler zu erhalten, wurde die Struktur transformiert, so dass die interagierenden Komponenten zwischen Vergenz und Akkommodation vor dem Regler abgreifen und auch dort einwirken. Für die Feinabstimmung des dynamischen Verhaltens wurden des Weiteren Glieder erster und dritter Ordnung eingefügt. Mit einer Optimierung der Parameter mit dem Ziel, das linearisierte Eingangs-Ausgangsverhalten korrekt darzustellen, konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

Um das korrekte statische Verhalten zu erreichen, muss jeweils nach der Regelabweichung eine Totzone eingefügt werden. Des Weiteren muss das Glied der akkommodativen Vergenz eine Nichtlinearität enthalten, weil sonst bei Eintritt der Akkommodationssättigung eine im Vergleich zur Beobachtung sehr große akkommodative Vergenz auftritt.

Durch die Implementierung der altersabhängigen Parametrisierung der Regler und Strecken konnte ein neues Modell entwickelt werden, welches die statischen und dynamischen Eigenschaften von Akkommodation und Vergenz in Abhängigkeit vom Alter korrekt darstellt.

Literatur:

[1] Hung, G. ; Ciuffreda, K. ; Khosroyani, M. ; Jiang, B.-C.: Models of accommodation. In: Hung, G. ; Ciuffreda, K.: Models of the visual system. Kluwer Academic Publishers, 2002, S. 287-339

[2] Klink, S. ; Bergemann, M. ; Bretthauer, G.: Simulation of a mechatronic microsystem's intervention into the human accommodation system. In: mechatronics 2006- 4th IFAC-Symposium on Mechatronic Systems, 2006, S. 484-489

Sättigende, weich strukturvariable Regelungen

Michael Buhl *

* Lehrstuhl für Regelungstechnik
TU München
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching
Telefon: +49-89-289-15670
Fax: +49-89-289-15653
E-Mail: buhl@tum.de

Boris Lohmann **

** Lehrstuhl für Regelungstechnik
TU München
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching
Telefon: +49-89-289-15610
Fax: +49-89-289-15653
E-Mail: lohmann@tum.de

Schlüsselwörter: weich strukturvariable Regelung, Stellgrößenbegrenzung

Neben Modellunsicherheiten und Totzeiten wird die dynamische Leistungsfähigkeit von Regelungen wesentlich durch Begrenzungen der Stellgrößen bestimmt. Basierend auf dem Maximumprinzip ist bekannt, dass eine zeitoptimale Überführung eines Systems von einem Zustand in einen anderen die volle Ausnutzung der Stellgröße bedingt. Die Berechnung der hierzu nötigen Schaltflächen erfordert jedoch für schwingungsfähige Systeme oder Systeme größerer Ordnung ($n > 2$) einen hohen numerischen Aufwand. Um ferner nicht mit der Stabilitätsanalyse nichtlinearer Systeme konfrontiert zu werden, werden lineare Strecken mit Stellgrößenbegrenzung in der Praxis häufig so geregelt, dass die Stellgrößenbegrenzung nie erreicht wird, was zu einer entsprechend langsamen Dynamik führt.

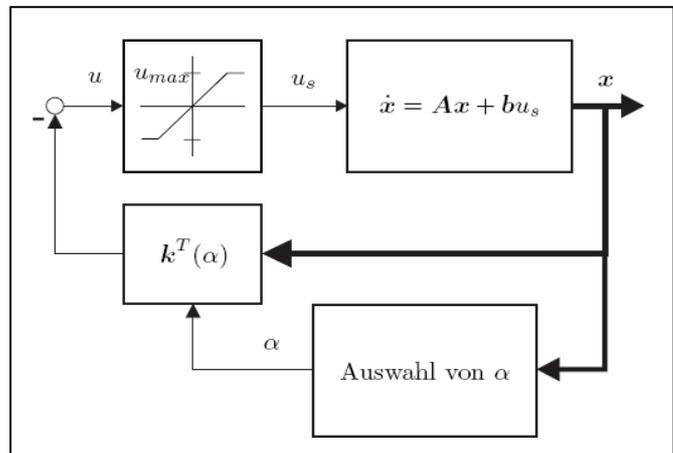


Abbildung 1: weiche SVR

Dieser Beitrag stellt ein Entwurfsverfahren für eine weich strukturvariable Regelung (SVR) vor, welche den Stellgrößenhub in größeren Bereichen des Zustandsraums voll ausnutzt und sich so der zeitoptimalen Regelung nähert.

Abbildung 1 zeigt eine Anordnung, in der eine Zustandsrückführung k über einen Parameter α zustandsabhängig variiert wird. Die Auswahl von α erfolgt so, dass in größeren Bereichen des Zustandsraums die kommandierte Stellgröße u größer als der maximale Stellhub u_{\max} ist. Letztere Eigenschaft unterscheidet die hier vorgeschlagene gesättigte von den in [1] beschriebenen, klassischen SVR.

Der Stabilitätsnachweis, die Bestimmung der Rückführungen $k(\alpha)$ sowie die Auswahlstrategie für α basieren auf Lyapunov-Funktionen. Diese werden über die Forderung

$$\dot{V} = -\alpha V$$

gefunden und erlauben eine analytische Abschätzung des Einzugsbereichs einer Ruhelage. Damit kann die Variation des Parameters α so erfolgen, dass stets die „schnellste“ Rückführung gewählt wird, deren Einzugsbereich den aktuellen Zustand

beinhaltet. Auf diese Weise kann eine hohe Dynamik bei gesicherter Stabilität erreicht werden.

Literatur:

- [1] Adamy, J.; Flemming, A.: Soft variable-structure controls: a survey, *Automatica*, 40:1821–1844, 2004.
- [2] Buhl, M.; Lohmann, B.: Schaltende Regler für Systeme mit Stellgrößenbegrenzung, *Methoden der Regelungstechnik - Erlangen-Münchner Workshop 2005 und 2006*, Shaker-Verlag.
- [3] Hu, T.; Lin, Z.; Chen, B. : An analysis and design method for linear systems subject to actuator saturation and disturbance, *Automatica*, 38:351–359, 2002.
- [4] De Doná, J.A.; Goodwin, G.C.; Moheimani, S.O.R.: Combining switching, oversaturation and scaling to optimise control performance in the presence of model uncertainty and input saturation, *Automatica*, 38:1153–1162, 2002.
- [5] Ch. Roduner: Die Riccati-Gleichung, IMRT-Report Nr. 26, ETH, Zurich, Switzerland, April 1994.

LMI-Entwurf schneller Regelungen für lineare Regelstrecken mit Stell- und Zustandsgrößenbeschränkung

Dilyana Yankulova *

Jürgen Adamy **

* Regelungstheorie und Robotik/IAT
TU Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4
64283 Darmstadt
Telefon: 06151 16 5329
Fax: 06151 16 2507

** Regelungstheorie und Robotik/IAT
TU Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4
64283 Darmstadt
Telefon: 06151 16 3442
Fax: 06151 16 2507

E-Mail: dilyana.yankulova@rtr.tu-darmstadt.de

E-Mail: adamy@rtr.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: schnelle Regelungen, Zustandsgrößenbeschränkung, LMI-Entwurf, weiche strukturvariable Regelung, implizite Ljapunov-Funktionen

Lineare Regelungen sind aufgrund des einfachen Entwurfs weit verbreitet. Sie eignen sich aber nur bedingt für Problemstellungen, bei denen eine möglichst schnelle Ausregelung erwünscht ist, da sie aufgrund der schlechten Stellgrößenausnutzung hinter den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zurückbleiben. Will man die vollständige Stellgröße ausnutzen, so lassen sich mit Hilfe des Maximum-Prinzips von Pontrjagin zeitoptimale Regelungen entwerfen. Im allgemeinen sind diese aber sehr aufwendig zu bestimmen und außerordentlich komplex zu realisieren. Ein Kompromiss zwischen den beiden Extrema stellt die weiche strukturvariable Regelung dar. Damit lässt sich eine schnelle Regelung mit vertretbarem Entwurfsaufwand bestimmen.

Weiche strukturvariable Regler sind nichtlineare Zustandsregler für lineare Strecken mit Stell- und Zustandsgrößenbeschränkungen. Die Koeffizienten des Zustandsreglers werden basierend auf einer kontinuierlichen, zustandsabhängigen Funktion verändert. Diese Funktion lässt sich unterschiedlich definieren. Dadurch entstehen drei verschiedene Typen von weichen strukturvariablen Reglern: weiche strukturvariable Regelung mit variabler Sättigung [4], dynamische weiche strukturvariable Regelung [6], [7] und weiche strukturvariable Regelung mittels impliziten Ljapunov-Funktionen [1], [2], [3].

In dieser Arbeit wird die weiche strukturvariable Regelung mittels impliziten Ljapunov-Funktionen betrachtet. Die Auswahlfunktion für die Reglerkoeffizienten ist hier gleich der implizit vorgegebenen Ljapunov-Funktion des Systems. Die Reglerkoeffizienten werden in Abhängigkeit von dieser Funktion so verändert, dass die Pole der geregelten Strecke beim Einhalten der Stellgrößenbeschränkung nach links verschoben werden, je mehr man sich der Ruhelage annähert [3]. Die Regelung wird dadurch schneller und die zur Verfügung stehende Stellgröße wird besser ausgenutzt.

Beim Entwurf einer solchen Regelung sind ein linearer Zustandsregler \mathbf{k}_1 und eine positiv-definite Matrix \mathbf{R}_1 so zu bestimmen, dass die Stabilität des Systems sichergestellt ist und die implizit vorgegebene Ljapunov Funktion eindeutig ist. Diese Aufgabenstellung lässt sich in ein restringiertes Optimierungsproblem überführen,

das durch Evolutionsstrategien gelöst werden kann. Eine Optimierung mit Evolutionsstrategien ist aber in den meisten Fällen sehr zeitaufwendig und hängt stark von der Wahl geeigneter Strategieparameter ab. Außerdem lässt sich nicht beweisen, dass das erreichte Optimum global ist.

Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, bietet der hier vorgestellte Entwurf mit Hilfe von linearen Matrix-Ungleichungen(LMI). Es wird gezeigt, dass das restringierte Optimierungsproblem durch Vereinfachung einer der Beschränkungen und Wahl einer konvexen Gütefunktion in ein LMI-Problem umgeformt werden kann, für dessen Lösung leistungsfähige Algorithmen [5] zur Verfügung stehen. Dadurch lässt sich der Entwurf entscheidend vereinfachen und beschleunigen. Die Ergebnisse werden an einem praktischen Beispiel demonstriert.

Literatur:

- [1] Adamy, J. : Strukturvariable Regelungen mittels impliziter Ljapunov-Funktionen, Universität Dortmund, Diss., 1991
- [2] Adamy, J. : Implicit Lyapunov Functions and Isochrones of Linear Systems. In: IEEE Transactions on Automatic Control 50 (2005), Nr. 6, S. 874-879
- [3] Adamy, J. ; Flemming, A. : Soft variable-structure controls: a survey. In: Automatica 40 (2004), Nr. 40, S. 1821-1844
- [4] Albers, K. : Syntheseverfahren für nichtlineare parameter- und strukturvariable Zustandsregler unter Berücksichtigung von Begrenzungen, Universität
- [5] Boyd, S. ; El Ghaoui, L. ; Feron, E. ; Balakrishnan, V. : Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. SIAM, 1994
- [6] Franke, D. : Ausschöpfen von Stellgrößenbeschränkungen mittels weicher strukturvariabler Regelung. In: Regelungstechnik 10 (1982), S. 348-355
- [7] Franke, D. : Strukturvariable Regelung ohne Gleitzustände. In: Regelungstechnik 8 (1982), S. 271-276

Beobachter mit Zustandsaktualisierung und endlicher Konvergenzzeit für lineare Systeme

Tobias Raff

Frank Allgöwer

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Tel. 071168567743
Fax 071168567735
E-Mail raff@ist.uni-stuttgart.de

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Tel. 071168567733
Fax 071168567735
E-Mail allgower@ist.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Beobachter, Endliche Konvergenzzeit, Zustandsaktualisierung

Die meisten Beobachterentwurfsverfahren, darunter der Luenberger-Beobachter [6] oder das Kalman-Filter [5], verbindet, dass die Zustandsschätzungen nur asymptotisch gegen die realen Systemzustände konvergieren (siehe Abbildung 1). In einigen Fällen, zum Beispiel zur Verbesserung der Regelgüte oder der Prozessüberwachung, ist jedoch ein Beobachter mit endlicher Konvergenzzeit von Vorteil.

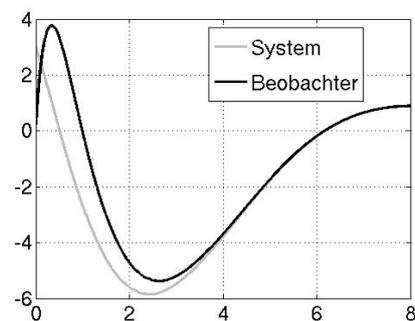


Abbildung 1: Asymptotisches Konvergenzverhalten.

Beobachter mit endlicher Konvergenzzeit für lineare zeitkontinuierliche Systeme sind zum Beispiel die in [1–4,7] beschriebenen Beobachter. Durch Verwendung von Informationen aus der Vergangenheit (zum Beispiel verzögerte Beobachterzustände [2], verzögerte Messgrößen [1,3,7] oder verzögerte Messfehler [7]) rekonstruieren diese Beobachter den exakten Systemzustand in vorherbestimmter endlicher Zeit (siehe Abbildung 2). Diese Beobachter sind jedoch praktisch eher schwierig zu realisieren, da sie wegen der Speicherung von Trajektorienstücken eine sehr große Speicherkapazität brauchen [1–3,7] und/oder wegen der schnellen Lösung von Faltungsintegralen eine große Rechenleistung benötigen [1,3,7].

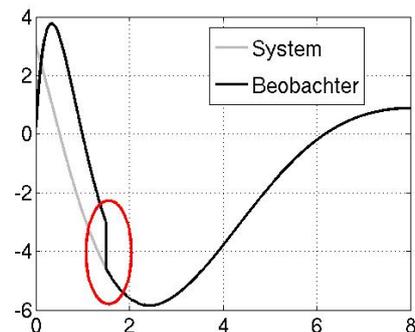


Abbildung 2: Endliche Konvergenzzeit.

In diesem Vortrag wird ein neuer Ansatz für Beobachter mit vorherbestimmter endlicher Konvergenzzeit vorgestellt [8] welcher die oben genannten Implementierungsprobleme vermeidet. Die endliche Konvergenzzeit des vorgeschlagenen Beobachters wird hierbei durch eine geeignete Aktualisierung der Beobachterzustände zu einem bestimmten diskreten Zeitpunkt erreicht. Diese Zustandsaktualisierung, welche einfach realisiert werden kann wenn der Beobachter zum Beispiel auf einem Mikrocontroller implementiert ist, bedingt ein impulsförmiges Verhalten der Beobachterdynamik und erreicht die gewünschte endliche Konvergenzzeit. Die Anwendbarkeit des Beobachters wird mittels eines Beispiels veranschaulicht.

Literatur:

- [1] W. Byrski. The survey for the exact and optimal state observers in hilbert spaces. In *Proceedings of European Control Conference*, 2003. paper on CD, paper number 598.
- [2] R. Engel and G. Kreisselmeier. A continuous-time observer which converges in finite time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47:1202–1204, 2002.
- [3] S.H. Han, W.H. Kwon, and P.S. Kim. Receding-horizon unbiased fir filters for continuous-time state-space models without a priori initial state information. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46:766– 770, 2001.
- [4] M.R. James. Finite time observers and observability. In *Proceedings of 29th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 770–771, 1990.
- [5] R.E. Kalman and R.S. Bucy. Observing the state of a linear system. *ASME Journal of Basic Engineering*, 83D:95–108, 1961.
- [6] D.G. Luenberger. Observers for multivariable systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11:190–197, 1966.
- [7] A.V. Medvedev and T. Toivonen. Feedforward time-delay structures in state estimation: finite memory smoothing and continuous deadbeat observers. *IEE Proceedings of Control Theory & Applications*, 141:121–129, 1994.
- [8] T. Raff and F. Allgöwer. An Impulsive Observer that Estimates the Exact State of a Linear Continuous-Time System in Predetermined Finite Time. In *Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2007.

Entwurf stabiler schaltender Regelkreise mit Hilfe von Polvorgabeverfahren

Kai Wulff*

* Fachgebiet Regelungssysteme
(Fak. Elektrotechnik u. Informatik)
Technische Universität Berlin
Einsteinufer 17, 10587 Berlin
Telefon 030 314 22276
Fax 030 314 21137
E-Mail wulff@control.tu-berlin.de

Fabian Wirth **

** Institut für Mathematik
Universität Würzburg
Am Hubland, 97074 Würzburg
Telefon (0931) 888-5007
Fax (0931) 888-4611
fabian.wirth@mathematik.uni-wuerzburg.de

Robert Shorten ***

*** Hamilton Institute
NUI Maynooth
Maynooth, Co. Kildare, Ireland
+353 1 708 45 98
+353 1 708 6269
robert.shorten@nuim.ie

Schlüsselwörter: Stabilität schaltender Systeme, absolute Stabilität, Entwurfsverfahren für schaltende Regler

In vielen praktischen Anwendungen ist es zweckmäßig, die Regelstrecke durch lineare zeitvariante Modelle zu beschreiben. Beispielsweise kann eine nichtlineare Dynamik über einen großen Arbeitsbereich stückweise linear approximiert werden. In diesem Beitrag betrachten wir Regelstrecken, die zwischen einer Anzahl linearer zeitinvarianter Systembeschreibungen schalten. Oft kommen in solchen Fällen geschaltete Regler zum Einsatz, bei denen die Stellgröße je nach Anforderung durch Umschalten der Ausgänge einer Anzahl linearer zeitinvarianter Regler erzeugt wird (siehe Abbildung 1).

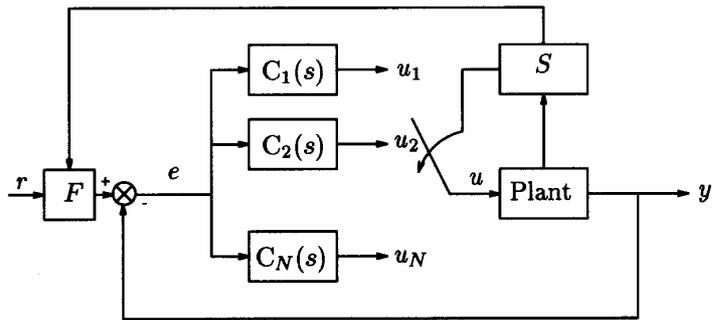


Abbildung 1: Beispiel eines schaltenden Systems

Ein solches lineares geschaltetes System weist dynamisches Verhalten auf, das nicht allein durch die linearen zeitinvarianten Übertragungsfunktionen beschrieben werden kann. So ist sowohl das Stabilitätsverhalten als auch das transiente Verhalten wesentlich komplexer als bei linearen zeitinvarianten Regelkreisen. Der dynamische Einfluss des Schaltens reicht soweit, dass selbst Systeme, die ausschließlich aus stabilen zeitinvarianten Regelschleifen bestehen instabiles Verhalten aufweisen können. Die Stabilitätsanalyse solcher Systeme ist außerordentlich komplex. Trotz einer Vielzahl von Ergebnissen auf diesem Gebiet gibt es wenige *konstruktive* Verfahren zum Entwurf und zur Analyse von schaltenden Regelkreisen (siehe z. B. [1], [2], [3] für eine Literaturübersicht).

In diesem Beitrag wird ein Regelentwurf für ein autonom schaltendes lineares Eingrößensystem mit N Untersystemen betrachtet: zu jedem Zeitpunkt wird die Systemdynamik von genau einem dieser Untersysteme bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass die Schaltvorgänge der Regelstrecke nicht beeinflusst werden können, jedoch sei zu jeder Zeit bekannt, welches der Untersysteme aktiv ist. Das Regelungsziel für den geschalteten Regelkreis sei unabhängig vom Schaltzustand der Strecke. In diesem Sinne können die Schaltvorgänge der Strecke als Störung

interpretiert werden. Daher ist es notwendig (jedoch nicht hinreichend) für jedes der N Untersysteme der Streckendynamik einen individuellen Regler zu finden, der die Spezifikation für den geschlossenen Regelkreis erfüllt.

Für den Entwurf der einzelnen Regler wird ein Polvorgabeverfahren vorgeschlagen, wobei die gewünschten vorgegebenen Pole für die N zeitinvarianten Regelkreise identisch sind [4,5]. In diesem Beitrag analysieren wir die Stabilität des resultierenden geschalteten Regelkreises und diskutieren die Realisierung des geschalteten Reglers. Basierend auf Ansätze in [6] zeigen wir, dass sich die Stabilitätsanalyse des schaltenden Systems für eine geeignete Realisierung erheblich vereinfachen lässt.

Darüber hinaus können durch die Schaltvorgänge erhebliche transiente Bewegungen induziert werden (siehe Abbildung 2 li.). Wir leiten einfache zusätzliche Bedingungen für den Reglerentwurf her, die diese transiente Dynamik reduzieren und unter bestimmten Bedingungen vollständig vermeiden, ohne dass es einer Initialisierung der Reglerzustände zum Schaltzeitpunkt bedarf (siehe Abbildung 2 re.).

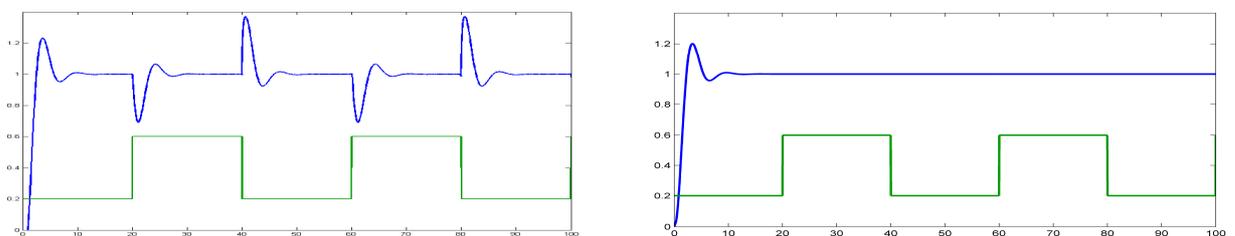


Abbildung 2: Sprungantwort eines geschalteten Systems ohne (links) und mit Vermeidung von Schalttransienten (rechts)

Literatur:

- [1] D. Liberzon and A. S. Morse, "Basic problems in stability and design of switched systems", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 59–70, 1999.
- [2] R. DeCarlo, M. Branicky, S. Pettersson, and B. Lennartson, "Perspectives and results on the stability and stabilisability of hybrid systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 7, pp. 1069–1082, 2000.
- [3] R. Shorten, F. Wirth, O. Mason, K. Wulff, and C. King. "Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems". *SIAM Review*, 49(4):545–592, 2007.
- [4] K. Wulff, "Quadratic and Non-Quadratic Stability Criteria for Switched Linear Systems". *PhD thesis, Hamilton Institute, NUI Maynooth*, 2005.
- [5] Kai Wulff, Fabian Wirth, and Robert Shorten. "On the stabilisation of a class of switched single-input single-output systems". *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Sevilla, 2005.
- [6] R. N. Shorten and F. 'O Cairbre, "A new methodology for the stability analysis of pairwise triangular and related switching systems," *Institute of Mathematics and its Applications: Journal of Applied Mathematics*, vol. 67, pp. 441–457, 2002.

Untersuchungen zum Einsatz von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren in der Robotik

René Franke *

Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik *
Technische Universität Dortmund
Otto-Hahn-Straße 4
Tel.: 0231-755-3762
Fax: 0231-755-2752
rene.franke@uni-dortmund.de

Torsten Bertram **

Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik **
Technische Universität Dortmund
Otto-Hahn-Straße 4
Tel.: 0231-755-2760
Fax: 0231-755-2752
torsten.bertram@uni-dortmund.de

Schlüsselwörter: Industrieroboter, FBG-Sensoren, Positioniergenauigkeit

In vielen Anwendungsfeldern der Robotik wird eine hochgenaue Positionierung beziehungsweise Positionsbestimmung gefordert, beispielsweise in der Medizintechnik und bei Arbeiten in sicherheitskritischen Umgebungen. Diese Aufgabe stellt sich aber auch im Bereich der industriellen Fertigung beziehungsweise eröffnet dort neue Möglichkeiten für eine wettbewerbsfähigere Produktion. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt *KomoRob* wird ein autonomer und mobiler Serviceroboter für die Vor-Ort-Instandsetzung von Tiefzieh- und Spritzgusswerkzeugen durch Auftragschweißen entwickelt. Die Bearbeitung solcher Werkzeuge erfolgt bisher manuell und ist überaus zeit- und kostenintensiv. Zukünftig soll ein Industrieroboter ein entsprechendes Werkzeug selbstständig vermessen, fehlerhafte Stellen lokalisieren und diese durch Auftragschweißen ausbessern. Insbesondere für die Vermessung des Werkzeugs ist eine hochgenaue Positionsbestimmung des Roboterendeffektors erforderlich. Trotz der steifen Konstruktion gängiger Industrieroboter und des Einsatzes entsprechender Kalibrierungsverfahren ist die geforderte Positioniergenauigkeit stark von den im System vorhandenen Elastizitäten abhängig. Zu diesen zählen die durch die häufig bei Industrierobotern eingesetzten Harmonic Drive Getriebe verursachten Gelenkelastizitäten einerseits, sowie die Elastizitäten der einzelnen Armkörper andererseits. Zur Untersuchung der Elastizitäten der Gelenke werden innerhalb des Projekts abtriebsseitig applizierte hochpräzise Winkeldrehgeber eingesetzt. Zur Erfassung der Verformungen der Armkörper kommen Faser-Bragg-Gitter(FBG)-Sensoren zum Einsatz, welche auf den Armkörpern durch verkleben appliziert werden. In Abbildung 1 (links) ist der Industrieroboter des Lehrstuhls mit Zusatzsensorik dargestellt, dieser wird für die experimentellen Untersuchungen eingesetzt. Dieser Beitrag befasst sich im Wesentlichen mit dem Einsatz der FBG-Sensorik zur Erfassung der Elastizitäten der Roboterkörper sowohl im Hinblick auf eine Anwendung innerhalb des zuvor beschriebenen Projekts, als auch mit den Möglichkeiten, die sich bei einem Einsatz dieser Sensorik im Leichtbau ergeben. Wird bewusst auf eine sehr flexible Bauweise unter Verzicht auf den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen gesetzt, so müssen die durch die Leichtbauweise auftretenden strukturellen Elastizitäten, welche einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Dynamik solcher Systeme haben, unbedingt bei der Modellierung und Regelung berücksichtigt werden. Dieses kann geschehen indem FBG-Sensoren eingesetzt werden, um die Elastizitäten online zu erfassen und mithilfe der Sensormesswerte eine genauere Modellierung des Gesamtsystems durchzuführen. Bei der experimentellen Spannungsanalyse zur dynamischen und statischen Belastungsuntersuchung mechanischer Systeme kommen zurzeit meist konventionelle

Dehnungsmessstreifen zum Einsatz. Allerdings haben die Forschungsaktivitäten zur Realisierung neuartiger verteilter Sensoren auf Basis von Lichtwellenleitern, insbesondere im Zusammenhang mit der Integration der Sensorfasern in technischen Anlagen und Verbundwerkstoffen, stark zugenommen [2]. Bei den vorgestellten FBG-Sensoren handelt es sich um intrinsische faseroptische Sensoren. FBG werden beispielsweise mit einem UV-Laser in den Kernbereich einer Monomode-Glasfaser eingeschrieben. Durch den Einschreibeprozess entsteht in Abhängigkeit von der Dotierung der Glasfaser und der unterschiedlichen Prozessparameter quer zur Ausbreitungsrichtung des Lichts eine periodische oder aperiodische Brechzahlstruktur, dargestellt in Abbildung 1 (rechts). Die so erzeugte Gitterstruktur hat die Eigenschaft das Licht einer bestimmten Wellenlänge zu reflektieren. Über die Variation der charakteristischen Parameter können Gitter mit unterschiedlichen Reflexionswellenlängen an unterschiedlichen Stellen genau einer Glasfaser eingeschrieben werden. Auf diese Weise kann eine Messung von Temperatur und Dehnung am jeweiligen Gitterort erfolgen. Die Vorteile der FBG-Sensoren liegen darin, dass sie durch Verkleben einfach zu applizieren und zudem EMV-stabil sind und sich daher für den Einsatz in der Robotik insbesondere auch in der Servicerobotik und damit im Homebereich hervorragend eignen. Innerhalb dieses Beitrages wird ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen die Modellierung der Reflexionsspektren der FBG-Sensoren bei unterschiedlichen auf das Gitter wirkenden Dehnungen vorgestellt. Zur Modellierung der Reflexionsspektren wurden in der Vergangenheit verschiedene Approximationsverfahren entwickelt [3], die gegenüber einer numerischen Lösung der Coupled-Mode-Gleichungen, welche den Energieaustausch und die Kopplung der sich innerhalb der Faser in positiver und negativer Richtung bewegenden elektromagnetischen Wellen beim Auftreffen auf eine Grenzschicht beschreiben, den Vorteil haben, dass sie weit weniger rechenintensiv sind und universeller für die Beschreibung unterschiedlicher Strukturen eingesetzt werden können. Daher wird hier die sogenannte Transfermatrix-Methode zur Modellierung der Reflexionsspektren vorgestellt. Die Modellbildung dient zum einen dem Verständnis des Gesamtprozesses und zum anderen einer anschließenden Optimierung des Selbigen. Zum Abschluss dieses Beitrages werden Experimente sowohl an einem einfachen Einzelprüfstand als auch an einem Industrieroboter (Reis) vorgestellt.

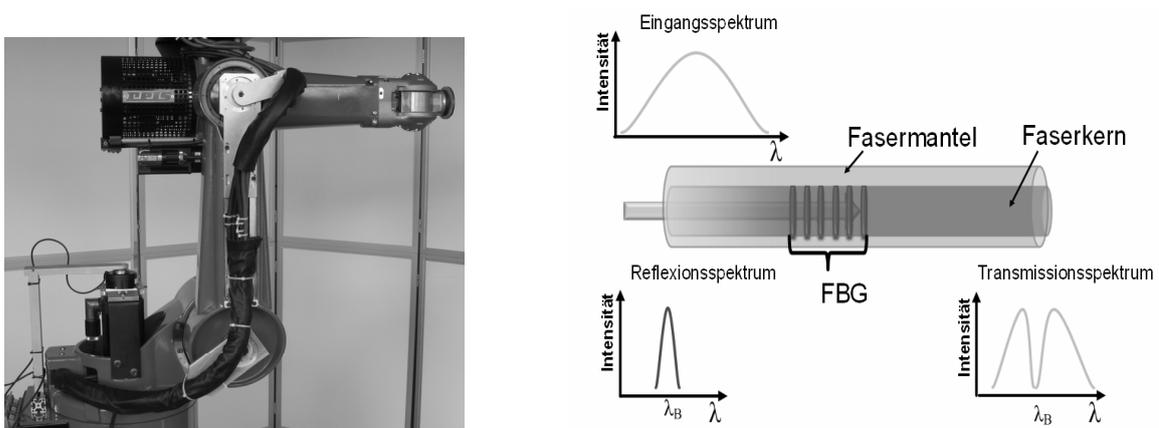


Abbildung 1: RV20-16 mit Sensorik (links); Aufbau eines Faser-Bragg-Gitters (rechts)

Literatur:

- [1] R. Franke, M. Sternke und T. Bertram, Messung und Modellierung der Verformung von Roboterkörpern mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren, Internationales Forum Mechatronik (ifm2007), Winterthur, Schweiz.
- [2] Tahir, B.A., et al.: Strain Measurement using Fiber Bragg Grating Sensor; American Journal of Applied Science: 2005, S. 40-48
- [3] Yamada, M., Sakuda, K.: Analysis of almost-periodic distributed feedback slab wave guides via a fundamental matrix approach; Applied Optics / Vol 26: 1987, S. 3474–3478

Sichere Pfadplanung für mobile Roboter unter Verwendung mengenbasierter Schätzalgorithmen

Sylvia Horn

Institut für Automatisierungstechnik
Fakultät für Elektrotechnik und
Informationstechnik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Tel.: +49-351-463-32722
Fax: +49-351-463-37039
Email: sylvia.horn@tu-dresden.de

Klaus Janschek

Institut für Automatisierungstechnik
Fakultät für Elektrotechnik und
Informationstechnik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Tel.: +49-351-463-34025
Fax: +49-351-463-37039
Email: klaus.janschek@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Mengenbasierte Zustandsschätzung, Mobile Robotik, Navigation, Pfadplanung, dynamische Hindernisvermeidung

In der mobilen Robotik gehört die Schätzung von internen, nicht messbaren Zuständen des nur unvollkommen bekannten, dynamischen Systems aus unsicheren Beobachtungen zu den bekannten Standardaufgaben. Im Allgemeinen wird hier eine stochastische Beschreibung der auftretenden systemimmanenten Unsicherheiten gewählt und ein (nichtlineares) Kalmanfilter zur Zustandsschätzung verwendet. Allerdings ist der stochastische Ansatz nur dann zielführend, wenn alle auftretenden Unsicherheiten als normalverteilt angenommen werden können.

In anderen Fällen, z.B. bei Modellierungs- und Quantisierungsfehlern oder bei der Angabe von geometrischen Toleranzen bei Sensorsystemen, bietet sich ein allgemeingültigerer auf der Mengentheorie basierender Ansatz an. Hier werden unter der Voraussetzung, dass die den Unsicherheiten zu Grunde liegenden Verteilungen unbekannt aber begrenzt sind, geometrische Eigenschaften der Unsicherheiten verwendet und diese als (nicht) konvexe Mengen beschrieben. In diesem Sinne kann auch von einem garantierten Einschlussgebiet gesprochen werden; das heißt der wahre Zustandsvektor liegt garantiert innerhalb der aus den fehlerbehafteten Systemgrößen geschätzten Zustandsmenge. Zur Beschreibung dieser Einschlussgebiete existieren bekannte Verfahren basierend auf konvexen, geometrischen Strukturen mit kompakten Beschreibungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel Hyperquader [1], Parallelepipede (Parallelotope) [2] und Ellipsoide [3, 4]. Es ist bekannt, dass diese unterschiedlichen Ansätze mehr oder minder gute Überschätzungen des realen Einschlussgebietes in Abhängigkeit von der gegebenen Systemstruktur und von veränderlichen Betriebsparametern ergeben.

Eine hohe Robustheit gegenüber einsatzabhängigen Überschätzungen wird durch den Einsatz eines mengenbasierten Multimodellschätzfilters [5] erreicht. Das vorgestellte Filter verringert die Überschätzung durch eine geeignete Kombination (Fusion) von verschiedenen mengenbasierten Verfahren und berechnet in jedem Rechenschritt ein Schätzgebiet mit minimalen Volumen. Die Leistungsfähigkeit des Multimodellfilters konnte bereits anhand einer Lokalisierungsaufgabe [6] erfolgreich nachgewiesen werden.

Von diesen positiven Ergebnissen ausgehend wird die Übertragbarkeit der mengenbasierten Schätzalgorithmen auf Fragestellungen der Pfadplanung von mobilen Plattformen untersucht. Ziel ist dabei die Berechnung von sicheren, kollisionsfreien Trajektorien in unbekanntem bzw. dynamischen Umgebungen unter Beachtung auftretender Modell-, Eingangs- und Messunsicherheiten. Die Ergebnisse werden anhand von Simulationsexperimenten dargestellt und bewertet.

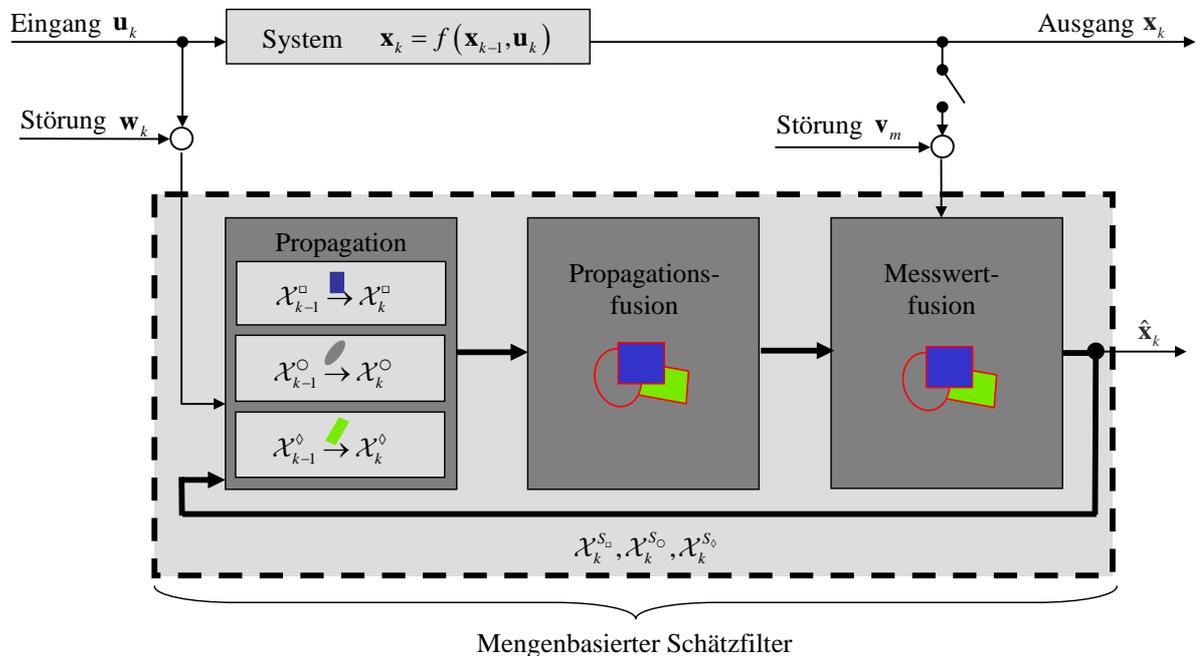


Abbildung 1: Prinzip des vorgestellten mengenbasierten Multimodellschätzfilters

Literatur:

- [1] A. Gning and P. Bonnifait. Dynamic vehicle localization using constraints propagation techniques on intervals: A comparison with kalman filtering. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA05)*, 4144-4149, 2005.
- [2] A. Garulli and A. Vicino. Set membership localization of mobile robots via angle measurements. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **Vol. 17(4)**:450-463, 2001.
- [3] U. D. Hanebeck and G. Schmidt. Set theoretic localization of fast mobile robots using an angle measurement technique. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1387-1394, 1996.
- [4] G. Calafiore. Reliable Localization using set-valued nonlinear filters. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics -- Part A: Systems and Humans*, **Vol. 35(2)**:189-197, 2005.
- [5] S. Horn and K. Janschek. A multi-model set membership estimator for mobile robot localization. In: *Proceedings of the Joint Conference on Robotics ISR/Robotik 2006*, VDI Berichte 1956-0090, 2006.
- [6] S. Horn and K. Janschek. A multi-model set membership estimator for mobile robot localization - experimental results. In: *Proceedings of the 7th Conference on Mobile Robots and Competitions, Paderne, Portugal*, 2007.

Entwicklung eines quasi-omnidirektionalen mobilen Roboters

Dr.-Ing. Ivan Masár

Prozesssteuerung und Regelungstechnik
FernUniversität in Hagen
Universitätsstr. 27
02331 987 1102
02331 987 354
Ivan.Masar@Fernuni-Hagen.de

Prof. Dr.-Ing. Helmut Hoyer

Prozesssteuerung und Regelungstechnik
FernUniversität in Hagen
Universitätsstr. 27
02331 987 1100
02331 987 354
Helmut.Hoyer@FernUni-Hagen.de

Schlüsselwörter: quasi-omnidirektionale mobile Roboter

Die stetig ansteigende Anzahl der erfolgreich realisierten robotertechnischen Applikationen ist heutzutage eine Triebkraft für die Entwicklung immer neuer Typen mobiler Roboter. Als ein progressiver Trend zeigen sich die Roboter mit solchen variablen kinematischen Strukturen, die man als sog. *quasi-omnidirektionale mobile Roboter* bezeichnen kann ([1],[2]). Im Gegensatz zu den klassischen omnidirektionalen Robotern, in denen eine omnidirektionale Bewegung durch die Anwendung eines Bewegungsapparates ohne nichtholonome Bindungen garantiert ist, erreichen die quasi-omnidirektionalen Roboter die Omnidirektionalität durch den Bewegungsapparat, dessen Konfiguration sich gemäß dem Typ der durchzuführenden Bewegung ändert.

Der Umbau der Konfiguration des Bewegungsmechanismus kann entweder während der Fahrt des Roboters oder im Stillstand geschehen, in der Abhängigkeit von dem Typ der Änderung der kinematischen Struktur und der mechanischen Ausführung einzelner Teile des Roboterfahrgestells. Die Änderungen in der Konfiguration der kinematischen Struktur müssen einerseits bereits in der Phase der Bahnplanung, andererseits bei der Regelung der Roboterbewegung berücksichtigt werden. Die Art der Änderung der Konfiguration des Roboterfahrgestells kann in der Abhängigkeit von der geplanten Trajektorie, von der Geschwindigkeit des Roboters oder von der Menge der für den Umbau aufgewendeten Energie optimiert werden.

Um die Eigenschaften und Einsatzgebiete dieser Klasse mobiler Roboter zu untersuchen, wurde auf unserem Lehrgebiet ein quasi-omnidirektionaler mobiler Roboter F.A.A.K. konstruiert und einige geeignete Methoden für seine Modellbildung, Regelung und Bewegungsplanung wurden entworfen. Der Roboter zeichnet sich durch eine hohe Manövrierfähigkeit, die besonders wichtig für den Einsatz in Gebäuden und künstlichen Umgebungen ist. Außerdem kann der Roboter dank seiner kinematischen Struktur einige nicht-konventionellen Bewegungen durchführen. Als Beispiel sind in der Abbildung 1 verschiedene mögliche Arten der Hindernisvermeidung des Roboters F.A.A.K. dargestellt.

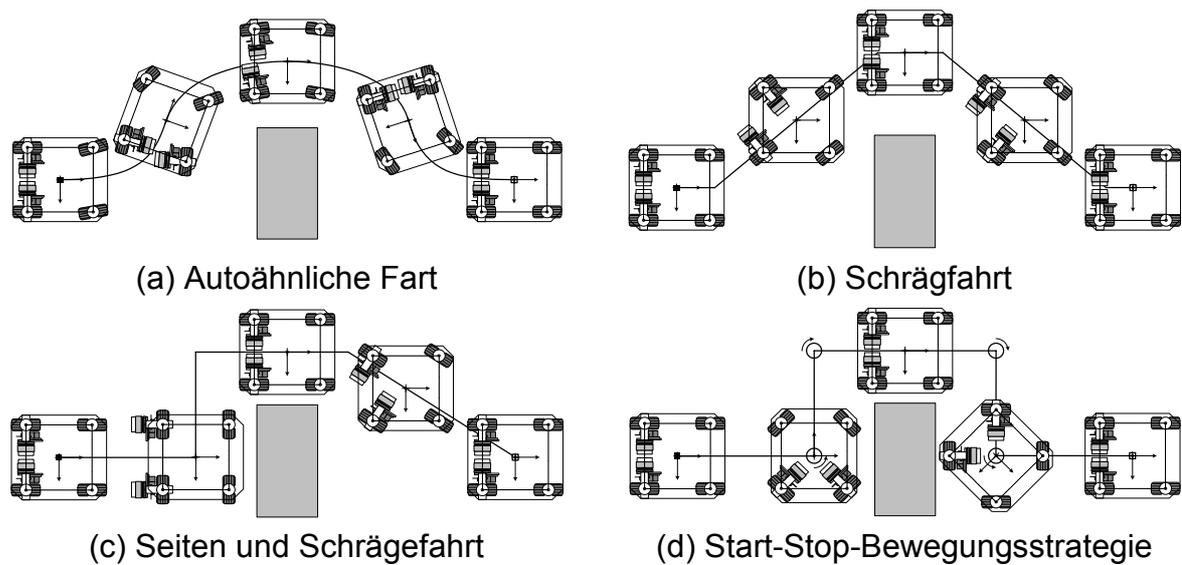


Abbildung 1: Bewegungsarten des Roboters

In unserem Vortrag werden näher die für den quasi-omnidirektionalen mobilen Roboter entworfenen Regelungs- und Bewegungsplanungstrategien vorgestellt. Erst wird eine neu entwickelte Methode für die synchrone Lenkung präsentiert, welche auf der Anwendung eines vereinfachten kinematischen Modells des Roboters basiert. Als zweites wird eine neuentwickelte, auf der Theorie der planaren Kurven aufgebaute Methode für die Regelung der radgetriebenen nichtholonomen Roboter präsentiert. Zuletzt wird ein ebenfalls neuentworfenes Verfahren für die Verfolgung einer geplanten Bahnkurve durch den Roboter wiedergegeben. Diese Methode basiert auf der Applikation von Werkzeugen der künstlichen Intelligenz, konkret eines neuronalen Netzes für die Modellierung des Roboters und eines Neuro-Fuzzy-Reglers für seine Regelung.

Literatur:

- [1] MORI, Y., NAKANO, E., TAKAHASHI, T., TAKAYAMA, K.: Mechanism and running modes of new omni-directional vehicle ODV9. In: *JSME International Journal Series C* 42 (1999), Nr. 1, S. 210–217
- [2] WEST, M., ASADA, H.: Design and control of ball wheel omnidirectional vehicles. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995, S. 1931–1938

Wahrscheinlichkeitsbasierte Sturzklassifikation von zweibeinigen Robotern

Oliver Höhn

Institut für Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 11, 30167 Hannover
0511-762-4521
0511-762-4536
hoehn@irt.uni-hannover.de

Wilfried Gerth

Institut für Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 11, 30167 Hannover
0511-762-4512
0511-762-4536
gerth@irt.uni-hannover.de

Schlüsselwörter: Zweibeinige Laufroboter, Sturzerkennung, Klassifikation, Hidden-Markov-Modelle

Die zweibeinige Fortbewegung ermöglicht es Servicerobotern, sich mit größt möglicher Flexibilität im menschlichen Lebensraum zu bewegen. Durch den hohen Schwerpunkt und die kleine Fußaufstandsfläche führt sie jedoch auch zu einer erheblichen Sturzanfälligkeit. Der bisher übliche Ansatz besteht darin, stabile Trajektorien für die Bewegung des Roboters vorzugeben, wobei kleine Störungen z.B. durch eine Regelung auf Basis des ZMP (**Z**ero **M**oment **P**oint) (vgl. [1], [2]), ausgeregelt werden können. Allein mit dieser Stabilitätsregelung lässt sich ein Sturz bei ernsthaften Störungen jedoch nicht verhindern. Wie auch beim Menschen, sind für eine maximale Stabilität des Roboters mehrere, situationsabhängige Reflexe oder Regelungsstrategien erforderlich. Mögliche Reaktionen sind z.B. das Rudern mit den Armen oder das reflexartige Ausführen eines Ausfallschrittes.

In diesem Beitrag werden zwei wahrscheinlichkeitsbasierte Verfahren zur Sturzklassifikation präsentiert. Das Ziel ist es, den Zustand des Roboters einer bekannten Situation (Laufen, Treppensteigen, vermeidbarer Sturz nach vorne, unvermeidbarer Sturz zur Seite etc.) zuzuordnen, von der die optimale Regelungsstrategie oder Reflexreaktion bekannt ist. Zur Beurteilung des Zustands dient der aus den relevanten Sensordaten des Roboters zusammengesetzte Merkmalsvektor. Dieser umfasst u.a. die Orientierungen und Drehraten des Torso sowie des Standfußes, den CoP (**C**enter **o**f **P**ressure) [2] sowie die Gelenkstellungen. Jede Tätigkeit des Roboters wird durch eine bestimmte Lage des Merkmalsvektors \mathbf{x} im Merkmalsraum charakterisiert. Anhand des gemessenen Vektors \mathbf{x} ist es somit möglich, den Roboterzustand einer bekannten Situation zuzuordnen, um so die jeweils optimale Regelungsstrategie bzw. Reflexreaktion aktivieren zu können [3].

Der erste Klassifikationsansatz basiert auf der Beschreibung der zu klassifizierenden Situationen mit Hilfe von Gauß'schen-Mischverteilungsdichten. Während einer Trainingsphase werden Merkmalsvektoren, die bei verschiedenen Tätigkeiten bzw. Stürzen typischerweise auftreten, ermittelt. Mit diesen lässt sich für jede Klasse Ω eine Wahrscheinlichkeitsdichte $P(\mathbf{x}/\Omega)$ bestimmen. Unter Ausnutzung des Bayestheorems ergibt sich folgende Maximierungsaufgabe, um den Roboterzustand einer bekannten Situation Ω^* zuzuordnen:

$$\Omega^* = \operatorname{argmax}(P(\mathbf{x}/\Omega)P(\Omega)).$$

Der zweite Ansatz basiert auf der Auswertung der Merkmalsvektor-Sequenz, welche sich für bestimmte Tätigkeiten ergibt. So stellt sich beispielsweise beim ungestörten

Gehen ein typischer Zyklus im Merkmalsraum ein (vgl. Abbildung 1). Ähnlich der Spracherkennung, bei der Worte aus gesprochenen Lautsequenzen erkannt werden, ist es bei diesem Ansatz möglich, Sturzsituationen mit Hilfe der aufgezeichneten Merkmalsvektor-Sequenz zu detektieren. Für die Modellierung der Sequenzen kommen Hidden-Markov-Modelle (HMM) zum Einsatz, die sich schon seit Jahren auf dem Gebiet der automatischen Spracherkennung bewährt haben [4].

Zum Parametrieren der Verteilungsdichten bzw. HMM werden Trainingsdaten benötigt. Aufgrund des enormen Zeitaufwands und des großen Beschädigungsrisikos, scheidet für diese Aufgabe das Anlernen mit dem realen Roboter aus. Es wurde daher der Ansatz verfolgt, die Verfahren mit Hilfe von simulierten Sturzsituationen anzulernen und die so parametrierten Modelle im Anschluss auf den realen Roboter zu übertragen.

Im Vortrag werden die Klassifikationsansätze ausführlich dargelegt und es wird die Eignung der Verfahren zur Sturzklassifikation anhand realer und simulierter Sturz-szenarien demonstriert.

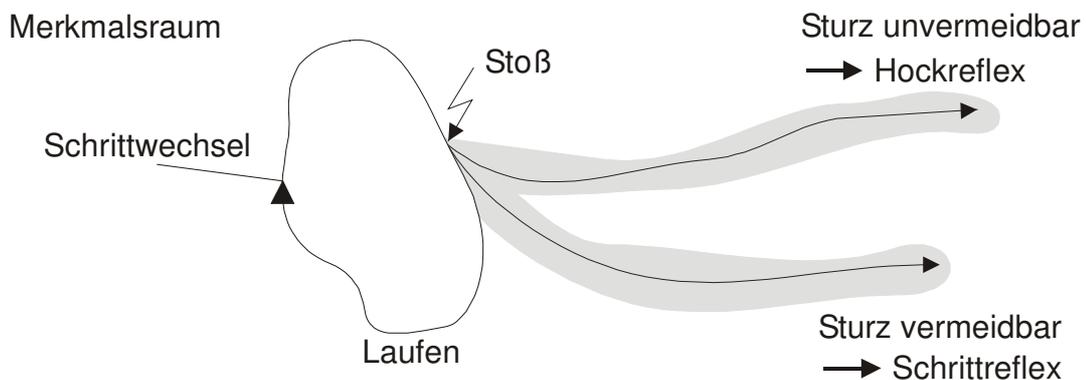


Abbildung 1: Trajektorien im Merkmalsraum. Dargestellt sind die Verläufe für das ungestörte Laufen sowie für zwei unterschiedliche Sturz-situationen.

Literatur:

- [1] Vukobratović, M. ; Borovac, B.: Zero-Moment Point - Thirty Five Years Of Its Life. In *International Journal of Humanoid Robotics* (2004), Nr. 1, S. 157–173
- [2] Popovic, M. B. ; Goswami, A. ; Herr, H.: Ground Reference Points in Legged Locomotion: Definitions, Biological Trajectories and Control Implications. In *The International Journal of Robotics Research* 24 (2005), Nr. 12, S. 1013–1032
- [3] Höhn, O. ; Gerth, W.: Probabilistic Balance Monitoring for Bipedal Robots. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines - CLAWAR 2006*, Brussels, S. 435–442
- [4] Rabiner, L. R.: A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition. In *Proceedings of the IEEE* (1989), Nr. 77, S. 257–285

The Renaissance of Systems Theory in Biology and Biomedicine Opportunities and Challenges

Olaf Wolkenhauer

Chair in Systems Biology & Bioinformatics
University of Rostock
Albert-Einstein-Str. 21
18051 Rostock
Tel. +49 (0)381 498 75 70
Fax: +49 (0)381 498 75 72
E-Mail olaf.wolkenhauer@uni-rostock.de
www.sbi.uni-rostock.de

While bioinformatics has been closely associated with the field of computer science, systems biology is particularly attractive for researchers from the engineering and physical sciences. The emergence of systems biology is, in parts, a consequence of the limitations we have reached in genomics and bioinformatics. As I shall argue, the engineering approach is a necessity, not a choice, if we are understand the functioning of cells. My presentation will discuss the renaissance of systems theory in biology and biomedicine, highlighting opportunities and challenges for systems- and control theory in this rapidly developing new field.

Hybride dynamische Systemmodelle in der Laufroboterregelung

Marion Sobotka

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik
Technische Universität München
80290 München
Tel.: 089-289-23402
Fax.: 089-289-28340
E-Mail: marion.sobotka@tum.de

Martin Buss

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik
Technische Universität München
80290 München
Tel.: 089-289-28396
Fax.: 089-289-28340
E-Mail: m.buss@ieee.org

Schlüsselwörter: hybride dynamische Systeme, zweibeinige Roboter, Trajektorienplanung, Gleichgewichtsregelung

Trajektorienplanung und Regelung für zweibeinige Laufmaschinen stellt noch immer eine Herausforderung dar. Es müssen nicht nur kontinuierliche Trajektorien im Gelenkraum, sondern auch das Eingehen und Lösen von Kontakten mit der Umgebung geplant und geregelt werden. Für die Fortbewegung gilt es dabei eine Folge von Kontaktsituationen zu realisieren, beim Balancieren dagegen muss der Übergang in unerwünschte Kontaktsituationen ausgeschlossen werden.

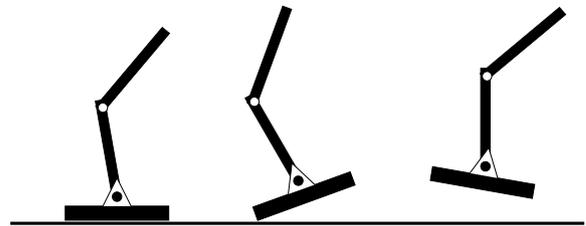


Abbildung 1: Mögliche Kontaktsituationen eines Fußes

In diesem Projekt werden Laufroboter mit zwei starren Füßen betrachtet. Zur Vereinfachung werden nur Bewegungen in der sagittalen Ebene erlaubt. Für einen Fuß sind mehrere Kontaktsituationen möglich, unter anderem flaches Aufliegen des Fußes auf dem Untergrund oder freie Rotation um die Fußkanten. Für den zweibeinigen Roboter ergeben sich dadurch Kontaktsituationen, die als diskrete Zustände eines hybriden Automaten interpretiert werden können. Diese Beschreibung der Roboterdynamik durch hybride (diskret-kontinuierliche) Systeme basiert auf der Annahme starrer Körper und instantaner Übergänge zwischen den Kontaktsituationen. Die Trajektorienplanung und Regelung verwendet die hybride Beschreibung der Systemdynamik.

Das Ziel der Bewegungsplanung ist periodische Trajektorien zu generieren. Es wird also eine periodische Bewegung der Gelenke zusammen mit einer sich periodisch wiederholenden Folge von Kontaktsituationen gesucht. Dafür wird ein Randwertproblem für die Periodizität gelöst, während eine parametrisierte Solltrajektorie im Gelenkraum vorgegeben wird. Die resultierenden Trajektorien sind nicht notwendigerweise orbital stabil und müssen auf Stabilität untersucht werden. Das Planungsverfahren erlaubt die effiziente Generierung einer parametrisierten Schar von Trajektorien. Um komplexere Bewegungsabläufe zu realisieren, kann an bestimmten Zeitpunkten zwischen Parameterkonfigurationen geschaltet werden. Durch die orbitale Stabilität der Trajektorien und die Überschneidung des

Einzugsgebiets der Zieltrajektorie mit der Starttrajektorie konvergiert das System gegen die Zieltrajektorie. Somit kann zum Beispiel der Gang beschleunigt werden, ohne weitere Planung von Übergangstrajektorien.

Bei der Regelung der Balance eines zweibeinigen Roboters stellt sich die Frage wie Rotation um die Fußkanten verhindert werden kann. Hier wird Anwendung der Invarianzregelung vorgeschlagen, ein Regelungsverfahren für regelungsaffine, nichtlineare Strecken mit beschränkten Ausgängen. Ziel ist es, die Kontaktkräfte zwischen Fuß und Boden in vorgegebenen Grenzen zu halten. Dieser Ansatz ermöglicht eine Interaktion des nominellen Reglers mit dem Korrekturregler, durch Angabe einer Schaltlogik. Es wird untersucht, für welchen Bereich des Zustandsraums dieser schaltende Regler zu erfolgreicher Stabilisierung der Balance führt.

Literatur:

- [1] M. Sobotka. Hybrid Dynamical System Methods for Legged Robot Locomotion with variable ground contact. Dissertation. Technische Universität München, 2007.
- [2] M. Sobotka und M. Buss. Locomotion studies for a 5DoF gymnastic robot. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Edmonton, Canada, 2005.
- [3] M. Sobotka, J. Wolff und M. Buss. Invariance controlled balance of legged robots. Proceedings of the European Control Conference (ECC). Kos, Greece, 2007.

Stabilisierung der periodischen Betriebsweise ereignisgesteuerter kontinuierlicher Systeme

Axel Schild *

Jan Lunze **

* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und
Prozessinformatik (ATP)
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstrasse 150, 44801 Bochum
Tel. 0234 32 25203
Fax 0234 32 14101
schild@atp.rub.de

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

Schlüsselwörter: Hybride dynamische Systeme, periodische Systeme, Grenzyklus

Ereignisgesteuerte kontinuierliche Systeme (EKS) bilden eine wichtige Klasse hybrider dynamischer Systeme, die beispielsweise in der Leistungselektronik, der Verfahrenstechnik und im Automobilbau auftreten [1,4]. Sie bestehen aus einer kontinuierlich wirkenden Regelstrecke, die in verschiedenen Betriebsmodi arbeiten kann, und einer ereignisdiskreten Steuereinrichtung (Regler) (Abb. 1). Da sowohl die Struktur als auch die Parameter der Regelstrecke vom Betriebsmodus abhängen, bewirkt ein durch den Regler ausgeführtes Umschalten des Modus eine wesentliche Veränderung der Streckendynamik. Die Steuereinrichtung ist so zu entwerfen, dass sie die Betriebsmodi der Regelstrecke in der richtigen Reihenfolge und zu den richtigen Zeitpunkten aktiviert und auf diese Weise durch ein fortwährendes Umschalten erreicht, dass die stationäre Bewegung von $\mathbf{x}(t)$ auf eine vorgegebene Zielmenge \mathcal{X}_T des Zustandsraums beschränkt wird (Abb. 2).

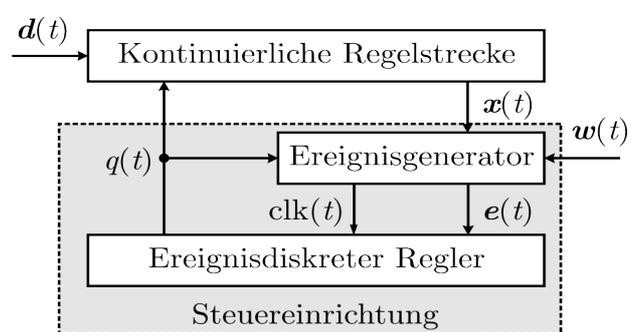


Abbildung 1: Ereignisgesteuertes kontinuierliches System

Die für ereignisgesteuerte Systeme zu lösende Regelungsaufgabe unterscheidet sich grundlegend von den Aufgaben für kontinuierliche Systeme, da hier das Ziel nicht im Erreichen und Stabilisieren eines Gleichgewichtspunktes liegt, sondern im Regelfall eine stationäre periodische Bewegung erhalten werden muss und nur zwischen diskreten Stellwerten gewählt werden kann. Den Übergang vom kontinuierlichen Zustand $\mathbf{x}(t)$ zur diskreten Stellgröße schafft ein Ereignisgenerator, der Bestandteil des Reglers ist. Er erzeugt ein Ereignis, wenn der kontinuierliche Zustand eine der in Abb. 2 gestrichelt eingetragenen Schaltflächen $\mathcal{S}(q)$ schneidet. Das ausgelöste Ereignis wird dabei durch die Ausgänge $e(t)$ und $clk(t)$ kodiert.

Der Vortrag präsentiert Regelungskonzepte zur Stabilisierung einer periodischen stationären Betriebsweise, die in Form eines Grenzyklus Γ vorgegeben ist (geschlossener Linienzug in Abb. 2) [2,3]. Die Grundidee besteht in der Aufteilung der Steuereinrichtung in zwei Komponenten. Der ereignisdiskrete Regler legt fest, welche Moduswechsel $q_k \rightarrow q_{k+1}$ für den Verbleib auf dem Grenzyklus zweckmäßig

sind, während der Ereignisgenerator die dazugehörigen Übergangszeitpunkte ermittelt. Die Bestimmung der Schaltflächen des Ereignisgenerators erweist sich dabei als das zentrale Entwurfsproblem.

Für den Entwurf des Ereignisgenerators werden zwei Konzepte präsentiert, die beide die lokale orbitale Stabilität eines Grenzzyklus Γ gewährleisten. Das erste Konzept basiert auf einer dynamischen Anpassung von nominellen Schaltebenen $\mathcal{S}_0(q)$ durch einen Schalt-

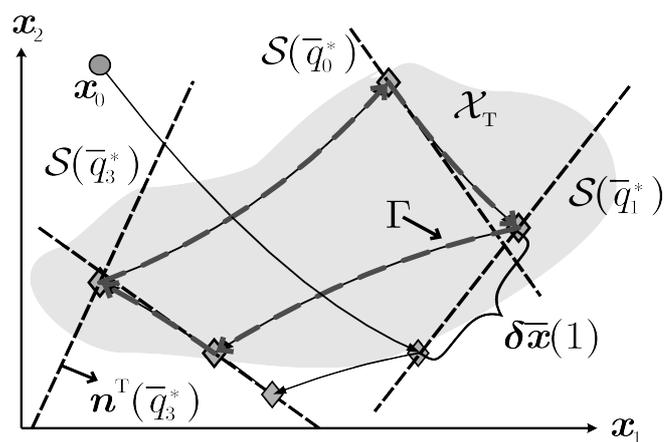


Abbildung 2: Einschwingvorgang auf einen Grenzzyklus mittels ereignisgesteuerten Schaltens

flächenregler. Dieser bestimmt zu den Umschaltzeitpunkten die Abweichung $\delta \mathbf{x}(k)$ zwischen dem aktuellen Zustand der Regelstrecke und dem Grenzzyklus Γ und reagiert mit einer geeigneten Verschiebung bzw. Verdrehung der nachfolgend geschnittenen Schaltebene $\mathcal{S}_0(q(k))$.

Beim zweiten Ansatz wird gezeigt, wie sich die Orientierungen $\mathbf{n}^T(q)$ von statischen Schaltebenen $\mathcal{S}(q)$ direkt bestimmen lassen. Für beide Ansätze wird darauf eingegangen, wie das eigentliche Entwurfsproblem in ein äquivalentes periodisches Regelungsproblem überführt und folglich mit klassischen Entwurfsmethoden gelöst werden kann.

Das Verhalten ereignisgesteuerter kontinuierlicher Systeme und die Wirksamkeit der hier vorgestellten Regelungskonzepte wird anhand von Experimenten mit einem Gleichspannungswandler demonstriert.

Literatur:

[1] M. Hellfeld, A. Schild, J. Krupar, J. Lunze, W. Schwarz: Beispielsammlung für ereignisgesteuerte kontinuierliche Systeme. *Forschungsbericht*, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, 2007, www.atp.rub.de/

[2] A. Schild, J. Lunze: Stabilization of limit cycles of discretely controlled continuous systems by controlling switching surfaces. In *Hybrid Systems: Computation and Control*, pp. 515-528, Springer-Verlag, Heidelberg, 2007

[3] A. Schild, J. Lunze: Switching surface design for periodically operated discretely controlled continuous systems. In *Hybrid Systems: Computation and Control*, Springer-Verlag, Heidelberg, 2008 (eingereicht)

[4] A. Schild, M. Hellfeld, J. Lunze, J. Krupar, W. Schwarz: Generalized hysteresis control of switching power converters. *IEEE Transactions on Power Electronics* (eingereicht)

Online-Analyse von Fahrstrategien kognitiver Automobile

Dipl.-Ing. Matthias Althoff *

* Lehrstuhl für Steuerungs- und
Regelungstechnik (LSR)
TU München
Theresienstraße 90, 80290 München
089-289-23434
089-289-28340
althoff@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Olaf Stursberg **

** Fachgebiet Industrielle
Automatisierungssysteme am LSR
TU München
Theresienstraße 90, 80290 München
089-289-23419
089-289-28340
stursberg@tum.de

Schlüsselwörter: Regelung autonomer Fahrzeuge, Sicherheitsbewertung, hybride Modelle, stochastische Verifikation, probabilistische Erreichbarkeitsmengen

Für autonome mobile Systeme, die im gleichen Arbeitsraum wie Menschen agieren, besteht die offensichtliche Anforderung, dass keine einen Menschen gefährdenden Aktionen ausgeführt werden dürfen. Dies gilt insbesondere für kognitive Fahrzeuge im Straßenverkehr, die auf der Basis von Messdaten die momentane Verkehrssituation einschätzen und eine Fahrstrategie selbsttätig generieren und ausführen. Im Rahmen dieses Vortrags wird eine Methodik vorgestellt, die berechnete Fahraktionen kognitiver Fahrzeuge online und vor der Ausführung auf deren Sicherheit überprüft. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Unfalls auf der Basis des geplanten Fahrwegs des kognitiven Fahrzeugs und den probabilistischen Erreichbarkeitsmengen anderer Verkehrsteilnehmer bestimmt.

Erreichbarkeitsmengen, als die Menge aller von einer Initialmenge aus in einem endlichen Zeitintervall erreichbaren Zustände, erlauben im Rahmen der Sicherheitsverifikation von Fahrstrategien den folgenden Schluss: Ist für ein geeignetes Modell die Schnittmenge der über ein gewähltes Zeitintervall konservativ berechneten Erreichbarkeitsmengen für die Positionen des kognitiven Fahrzeugs sowie der anderen Verkehrsteilnehmer in der Umgebung leer, so kann die Sicherheit der Fahrstrategie gefolgert werden. Ein entsprechendes Ergebnis lässt sich nicht mit Hilfe von Simulationstechniken erhalten, da unendlich viele Fahrtrajektorien anderer Verkehrsteilnehmer zu testen wären und keine konservative Auswertung der Modelle vorläge.

Bei Berücksichtigung aller möglichen Verhaltensweisen anderer Verkehrsteilnehmer und Verwendung deterministischer Erreichbarkeitsmengen führt die Verifikation häufig auf ein negatives Ergebnis für alle denkbaren Fahrstrategien. Es ist daher sinnvoll, auf eine probabilistische Betrachtung und auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Erreichbarkeitsmengen überzugehen. Ausgehend von einer stochastischen hybriden Modellierung von Verkehrsszenarien besteht eine effiziente Möglichkeit zur Bestimmung probabilistischer Erreichbarkeitsmengen in der konservativen Transformation in Markov-Ketten. Der Vortrag zeigt auf, wie die Transformation effizient durchführbar ist und die Interaktion zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern auf der Ebene der Markov-Ketten analysiert werden kann. Beispielhaft ist in Abb. 1 der zeitliche Verlauf probabilistischer Erreichbarkeitsmengen gezeigt. Die Analyse ist echtzeitfähig durchführbar und wird iterativ mit gleitendem Zeithorizont und an aktuellen Messdaten angepassten Modellen wiederholt.

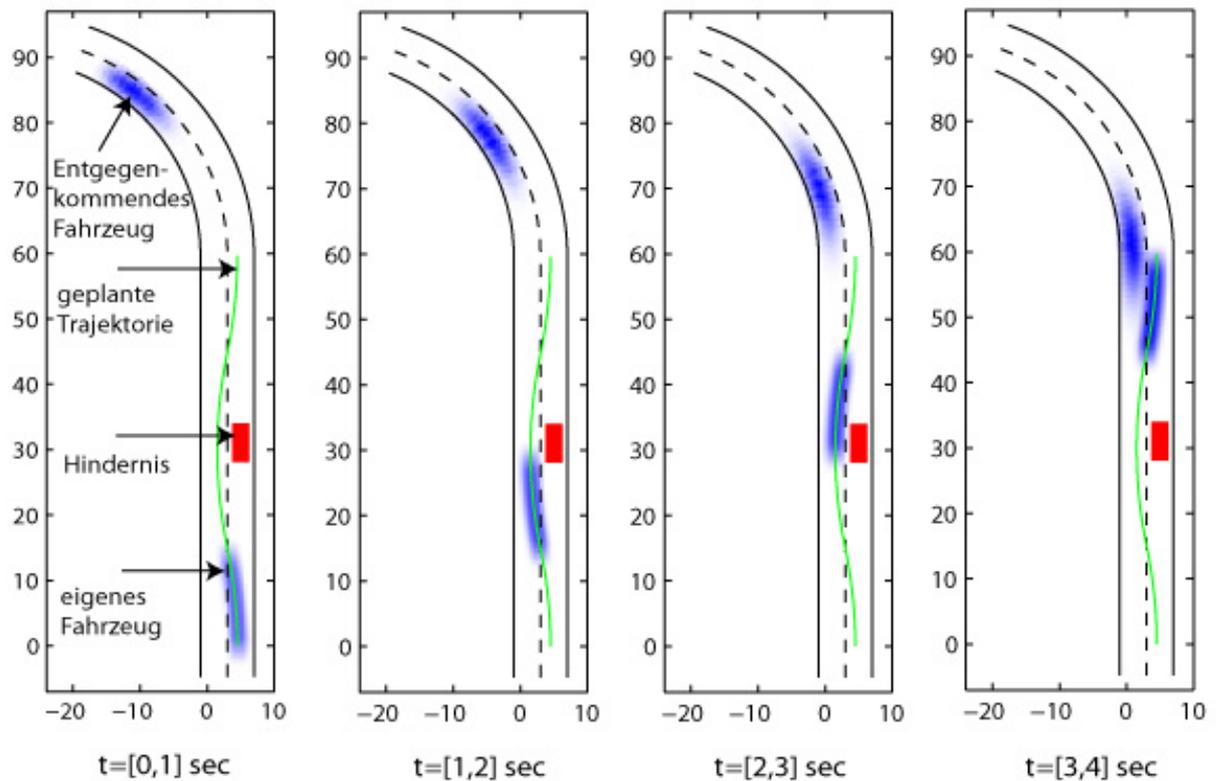


Abbildung 1

Literatur:

- [1] M. Althoff, O. Stursberg und M. Buss: "Safety assessment of autonomous cars using verification techniques". *Proc. of the American Control Conference*, 2007.
- [2] M. Althoff, O. Stursberg und M. Buss: "Online verification of cognitive car decisions". *Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2007.
- [3] M. Althoff, O. Stursberg und M. Buss: "Reachability analysis of linear systems with uncertain parameters and inputs", *Proc. of the 46th Conference on Decision and Control*, 2007.

Automatische Re-Implementierung von Steuerungsprogrammen

Dr.-Ing. Mohammed Bani Younis *

* Institut für Automatisierungstechnik
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der
Bundeswehr Hamburg
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg
Telefon 040 / 6541-3327
Fax 040 / 6541-2004
E-Mail baniy@hsu-hh.de

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay **

** Institut für Automatisierungstechnik
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der
Bundeswehr Hamburg
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg
Telefon 040 / 6541-2719
Fax 040 / 6541-2004
E-Mail alexander.fay@hsu-hh.de

Schlüsselwörter: Automaten, Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS), Re-Implementierung, IEC61131-3, XML

Für die Steuerung und Regelung industrieller Prozesse werden seit ca. 20 Jahren hauptsächlich speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) eingesetzt. Die Steuerungshardware hat in vielen Maschinen und Anlagen inzwischen das Ende ihrer wirtschaftlichen und technischen Lebensdauer erreicht und muss ersetzt werden. Die bewährten automatisierten Abläufe sollen hingegen bei dieser Modernisierung meist nicht verändert werden. Es besteht daher der verbreitete Wunsch, die Steuerungsprogramme auf eine neue SPS-Hardware zu übertragen und dort zu re-implementieren. Diese Re-Implementierung ist bislang eine zeitaufwändige, mühsame und fehlerträchtige manuelle Aufgabe, die nur unzureichend durch Methoden und Werkzeuge unterstützt wird.

In diesem Beitrag wird ein neues Verfahren zum Re-Implementierung von Steuerungsprogrammen vorgestellt. Die vorgestellten Methoden erlauben in Summe eine vollständige, durchgängig unterstützte und größtenteils automatisierte Re-Implementierung der SPS-Programme. Diese beginnt mit der Umwandlung (Reverse-Engineering) des als Datei vorliegenden SPS-Codes (z.B. der weit verbreiteten Anweisungsliste (AWL)) in eine formale Beschreibung. Hierzu wird der AWL-Code hinsichtlich der verwendeten Programmbefehle analysiert und strukturiert. In einem zweiten Schritt werden dann nicht mehr einzelne Programmzeilen, sondern zusammenhängende Abschnitte betrachtet; sie werden zusammengefasst in eine Folge von IF-THEN-ELSE-Anweisungen, die wiederum nach Automaten (FSM – Final-State-Machines) transformiert werden [1]. Auf der Ebene der FSM besteht die Möglichkeit, die Steuerungsabläufe einer formalen Analyse zu unterziehen. Die FSM bilden aber auch den Ausgangspunkt für die Re-Implementierung des vormaligen AWL-Programms in höheren Programmiersprachen, z.B. den Sprachen „Strukturierter Text (ST)“ und „Ablaufsprache (AS)“ gemäß dem Standard IEC 61131-3. Insbesondere wird angestrebt, im vorliegenden AWL-Code Ablaufsteuerungen als solche zu identifizieren (in Abgrenzung zu Verknüpfungssteuerungen) und diese Ablaufsteuerungen in AS zu re-implementieren. Dies kann die Lesbarkeit, Nachvollziehbarkeit und Wartbarkeit des Steuerungscode signifikant verbessern.

[1] M. Bani Younis: Re-Engineering Approach for PLC Programs based on Formal Methods. Shaker Verlag, Aachen, 2006.

IT-Sicherheit auf der Feldebene von Automatisierungssystemen

Felix Gutbrodt

Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 47
70550 Stuttgart
Tel.: +49 711 685 67306
Fax: +49 711 685 67302
E-Mail: felix.gutbrodt@ias.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: IT-Sicherheit, Feldebene, Automatisierungssystem

Dieser Vortrag gibt eine Einführung in die Problematik der IT-Sicherheit auf der Feldebene von Automatisierungssystemen. Zunächst werden mögliche unautorisierte Manipulationen (Angriffe) dargestellt, mit denen die korrekte Funktion von Automatisierungssystemen bedroht werden kann. Ausgehend von diesen Angriffen wird ein Schutzkonzept hergeleitet, mit welchem die Feldebene wirksam abgesichert werden kann. Um auf der Feldebene eingesetzt werden zu können, muss dieses Schutzkonzept die Eigenschaften und Randbedingungen der Feldebene berücksichtigen. Dabei ist insbesondere das Spannungsfeld zwischen der geringen Ressourcenkapazität der Systemelemente der Feldebene und dem großen Ressourcenbedarf von wirksamen Schutzfunktionalitäten zu betrachten. Zudem soll das Schutzkonzept nicht nur einen bestimmten Feldbus-/Feldgerätstandard absichern, sondern soll für unterschiedliche, auf der Feldebene eingesetzte Standards verwendbar sein. Auch die Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der Feldebene sind zu beachten. Basierend auf diesen Betrachtungen wurde das Schutzkonzept so realisiert, dass es bei der Absicherung von konkreten Automatisierungssystemen einfach an die zu erwarteten Bedrohungsszenarien und die zur Verfügung stehenden Ressourcen angepasst werden kann. Dabei ist es unabhängig von spezifischen Technologien und kann auch in harten Echtzeitsystemen eingesetzt werden. Es wird eine komponentenbasierte Umsetzung des Konzepts vorgestellt, welche trotz hoher Effizienz flexibel konfigurierbar ist und eine hohe Softwarequalität aufweist. Schließlich werden Erfahrungen beim Einsatz des Schutzkonzepts sowie die Grenzen des Schutzes dargestellt.

Mathematischer Sicherheitsnachweis verschachtelter CRC bei der Kommunikation nach dem ISO/OSI-Modell

Frank Schiller, Tina Mattes

Annemarie Mörwald

Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen
TU München
Boltzmannstr. 15
D-85748 Garching
{mattes, schiller}@itm.tum.de

Zentrum Mathematik (M11)
TU München
Boltzmannstr. 3
D-85748 Garching
annemarie.moerwald@mytum.de

Schlüsselwörter: Sicherheit, Kommunikation, Cyclic Redundancy Check, Codierung, Fehlererkennung, Restfehlerwahrscheinlichkeit

Der Cyclic Redundancy Check (CRC) ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Fehlererkennung bei der digitalen Datenübertragung. Anhand einer Prüfsumme (Frame Check Sequence, FCS), die aus den zu übertragenden Daten mittels einer Polynom-Modulodivision durch ein sogenanntes Generatorpolynom berechnet wird, können Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit erkannt werden. Ein Maß zur Güte der Fehlererkennung des CRC ist die Restfehlerwahrscheinlichkeit (P_{re}), d.h. die Wahrscheinlichkeit, mit der die Verfälschung eines Telegramms nicht erkannt wird. Für die Berechnung von P_{re} wurden einige Methoden entwickelt. Sie erfordern für Generatorpolynome hohen Grades bzw. für große Telegrammlängen in der Regel einen hohen Rechenaufwand (s. [1]).

Durch die standardisierte und häufig zugrundegelegte schichtenorientierte Kommunikation nach dem ISO/OSI-Modell (vgl. [2]) liegt in vielen Anwendungen eine Verschachtelung von CRC vor. (s. Abb. 1): Aus den ursprünglich zu versenden Daten,

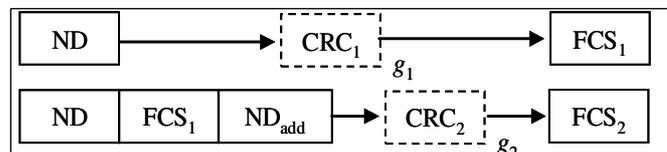


Abbildung 1: Verschachtelung mit Zusatzdaten

Nettodaten (ND), wird in einer Schicht mit einem Generatorpolynom g_1 die Prüfsumme FCS_1 berechnet und zu den Nettodaten hinzugefügt. ND und FCS_1 bilden ein Telegramm, das an die unterlagerten Schichten übertragen wird. In einer dieser Schichten werden dem Telegramm für diese Schicht spezifische zusätzliche Daten (ND_{add}) hinzugefügt. Über das so erweiterte Telegramm wird in einem zweiten CRC mit Generatorpolynom g_2 die FCS_2 berechnet. ND, FCS_1 , ND_{add} und FCS_2 bilden das Telegramm, das schließlich zum Empfänger geschickt wird.

Bisher wurde bei der Berechnung der Restfehlerwahrscheinlichkeit der gesamten Übertragung der zweite, unterlagerte CRC häufig nicht ausreichend berücksichtigt, da keine konkrete Berechnungsmethode für diese Art der Verschachtelung zur Verfügung stand. Es wurde daher zusätzlicher Aufwand (z.B. längere FCS_1) betrieben, um eine geforderte Sicherheit nachweisbar zu erreichen, die aber meist schon vorlag, nur noch nicht nachgewiesen werden konnte.

Im Vortrag werden eine effiziente Methode zur Berechnung der Restfehlerwahrscheinlichkeit dieser Kombination sowie einige Empfehlungen bzgl. Eigenschaften der Generatorpolynome und Längen der Daten ND und ND_{add} vorgestellt und diskutiert. Dabei werden nur unerkennbare Verfälschungen der Daten

ND berücksichtigt. Als Beispiel zeigt die Abbildung 2 den Verlauf der Restfehlerwahrscheinlichkeit über variable Bitfehlerwahrscheinlichkeit p für die Polynome $g_1=6Dh^1$ und $g_2=103h$ und verschiedene Nettodatenlängen.

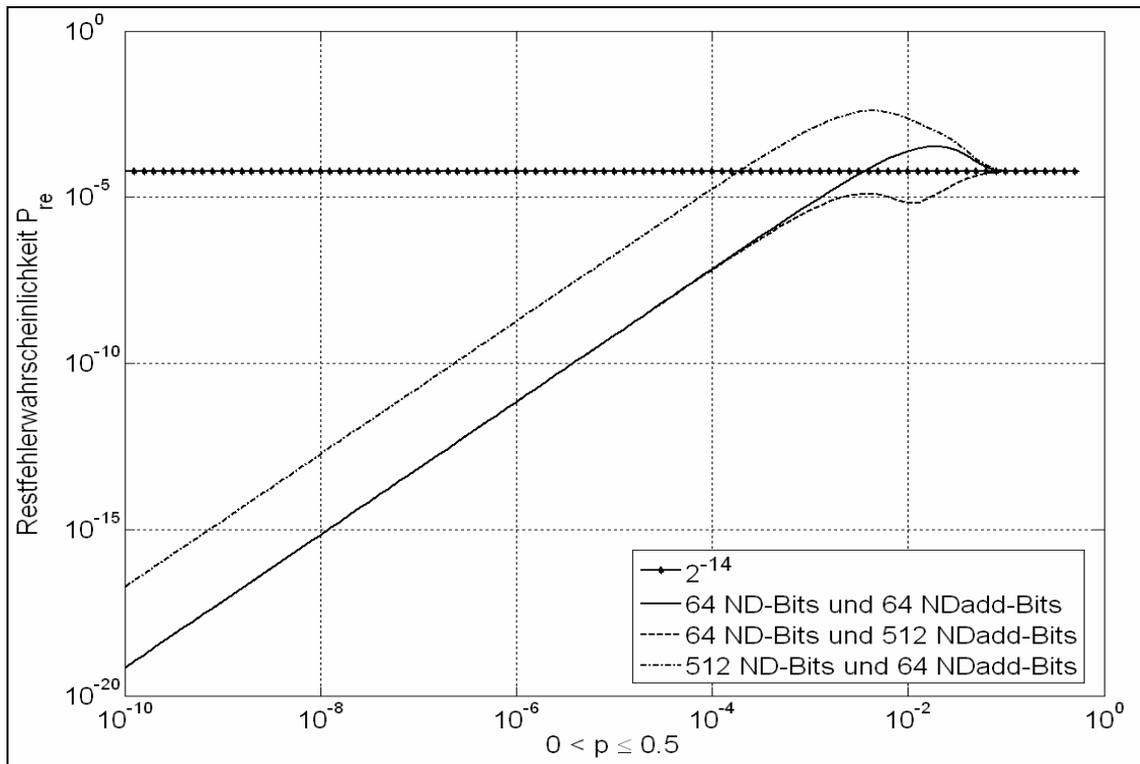


Abbildung 2: Restfehlerwahrscheinlichkeit für Polynome 6Dh und 103h für variable Längen von ND und ND_{add}

Der Wert der Restfehlerwahrscheinlichkeit kann in Abhängigkeit vom Generatorpolynom um Zehnerpotenzen schwanken. Durch die rechnerische Einbeziehung der unterlagerten Kommunikation kann deren Effizienz bei Einhaltung der geforderten Restfehlerwahrscheinlichkeit erhöht werden.

Literatur:

- [1] Schiller, F.; Mattes, T.: An efficient method to Evaluate CRC-Polynomials for Safety-Critical Industrial Communication, Journal of Applied Computer Science, Vol. 14, 1/2006, Technical University Press, Lodz, Poland, 2006; S. 57-80.
- [2] International Organization for Standardization, International Electrotechnical Commission (ISO/IEC), Information Technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model, (ISO/IEC 7498-1), 1996.
- [3] Mattes, T.; Schiller, F.; Mörwald, A.; Pfahler, J.; Honold, T.: Safety Proof of Combinations of CRC for Industrial Communication, XII International Conference-System Modelling and Control, Zakopane, Poland, October 17-19, 2007, ISBN 978-83-909816-2-8

¹ Polynome werden in hexadezimaler Schreibweise angegeben. 6Dh ist als Dualzahl 110 1101₂ und entspricht somit dem binären Polynom $x^6+x^5+x^3+x^2+1$.

Integrated Design of Fault Tolerant Wireless Networked Control Systems

C. I. Chihai^{*}, W. Li^{*}, S. X. Ding^{*}, O. Bredtmann^{**} and A. Czylik^{**}

^{*} Fachgebiet Automatisierungstechnik
und Komplexe Systeme
Universität Duisburg-Essen
Bismarckstr. 81 BB, 47048 Duisburg
Telefon: 0203 379 4292
Fax: 0203 379 2928
cristian.chihaia@uni-due.de

^{**} Fachgebiet Nachrichtentechnische Systeme
Universität Duisburg-Essen
Bismarckstr. 81 BA, 47048 Duisburg
Telefon: 0203 379 2546
Fax: 0203 379 2902
oliver.bredtmann@uni-due.de

Keywords: wireless networked control systems; fault tolerant systems; fault diagnosis

The wide application of networked control systems is the state of the art in the distributed industrial automation. Integrating networks into automatic control systems can significantly increase the automation degree, and allows a flexible system re-configuration with less wiring and a low-cost maintenance [1]. Wireless networked control systems (WNCS) have been recently introduced into many industrial sectors due to their higher flexibility, easy installation and extension.

In this presentation, an integrated design of fault tolerant WNCS will be briefly described. This work is a part of the DFG Project entitled *Observer based fault-tolerant monitoring of wireless networked control systems* (DI 773/10).

To meet high requirements on the real time system behaviour on the one side and to solve the problems with unreliable data transmission via wireless networks on the other side, an integrated design between communication and control is proposed. The design scheme meets the real time requirement and reduces packet loss rate by means of multiple transmissions or retransmissions, and decreases bit error rate by means of an advanced robust coding techniques.

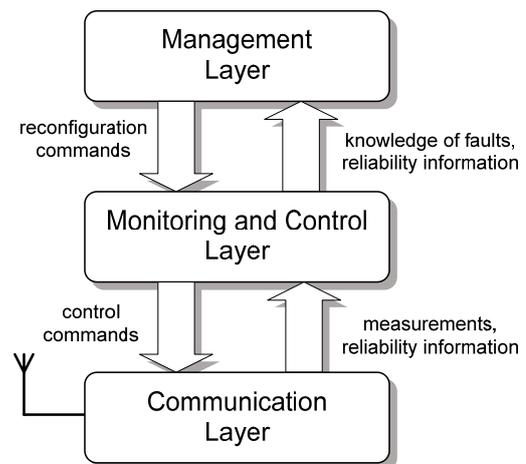


Figure 1: Multi-layer architecture for WNCS

Different from the known co-design schemes which are generally implemented at the application layer of WNCS, we propose a multi-layer integrated design of WNCS (see Fig. 1) which consists of:

- *Communication Layer* that transfers reliability information on the received data to the next layer. This can be done by providing the soft outputs of a channel code by means of log-likelihood-ratios. For ensuring a real-time communication with high reliability, a dynamic TDMA-like (Time Division Multiple Access) protocol was implemented, having as the

main features: (a) synchronization is realised by controller through a multicast transmission at the beginning of each cycle (period), thus avoiding the problem of drifting clocks; (b) the controller can request from any sensor to resend its measurement, as long as there are enough timeslots left in the current cycle; (c) control commands are packed in one message that is sent multiple times to the actuators, thus increasing the probability of a correct reception.

- *Monitoring and Control Layer* includes the control and the fault detection (FD) units. By using information from the communication layer, it generates control commands and delivers knowledge of faults to the management layer. In [2] an observer-based control and monitoring scheme was proposed for distributed NCS. New advanced FD approaches [3] were also developed to deal with bit errors and packet loss in order to achieve desired fault detection performance.
- *Management Layer* assures overall fault-tolerance of the WNCS. Any component, sensor, actuator or process component is considered a system resource that is needed for some functionality. A fault in one component will be considered as loss of the corresponding resource and activates resource re-allocation or reconfiguration of controller, FDI unit and communication schedule, by making use of the available redundancy in order to guarantee system operation.

The WNCS test bed is composed of desktop computers running real-time Linux (kernel version 2.6.20 with RT-Preempt patch) as operating system and which are equipped with standard WLAN cards (supporting IEEE 802.11a protocol). Modification of the card's driver was necessary in order to obtain a deterministic and bounded transmission delay.

References:

- [1] R. J. Patton, C. Kambhampati, A. Casavola, P. Zhang, S. X. Ding and D. Sauter - *A Generic Strategy for Fault-Tolerance in Control Systems Distributed over a Network*, European Journal of Control, 13: 280-296, 2007
- [2] S. X. Ding, P. Zhang – *Observer-based monitoring of distributed networked control systems*, 6th IFAC Symposium on Fault Detection and Safety of Technical Processes, Beijing, August 2006
- [3] W. Li, P. Zhang, S. X. Ding, O. Bredtmann – *Fault detection over noisy wireless channels*, the 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, 2007

Diagnose und Klassifikation von Aktuatorfehlern in nichtlinearen Systemen

Philipp Mai

Automatisierungs- und Regelungstechnik
(EIT 8.1)
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg Weg 39, 85579 Neubiberg
089-6004-3987
089-6004-4713
Philipp.Mai@unibw.de

Claus Hillermeier

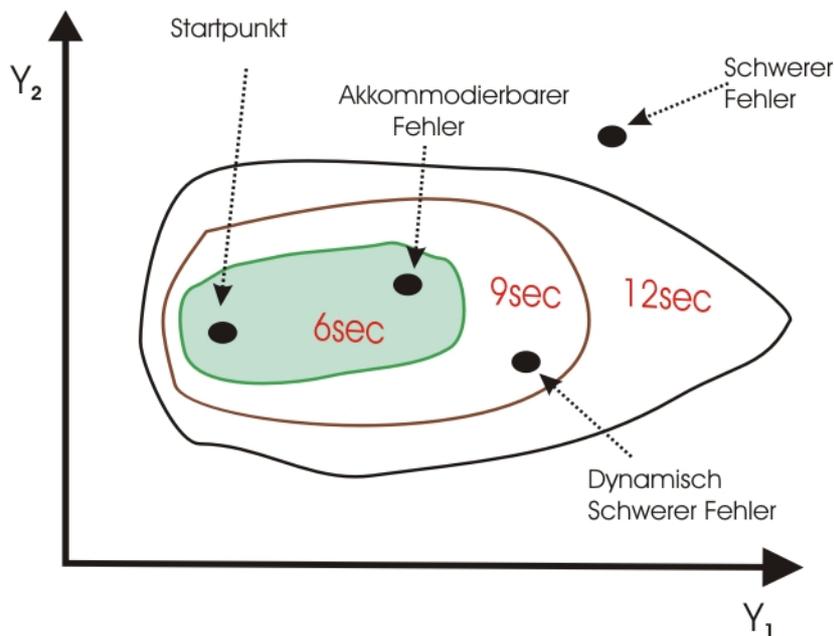
Automatisierungs- und Regelungstechnik
(EIT 8.1)
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg Weg 39, 85579 Neubiberg
089-6004-3985
089-6004-4713
Claus.Hillermeier@unibw.de

Schlüsselwörter:

Fehlertolerante Regelung, Ableitungsschätzverfahren, nichtlineare Systeme, Fehlerklassifizierung

Bei nichtlinearen dynamischen Systemen, welche die Eigenschaft der algebraischen Diagnostizierbarkeit erfüllen, ist es möglich, Aktuatorfehler, die in der Form unbekannter Eingänge auftreten, zu identifizieren. Dazu werden die Aktuatorfehler als algebraische Funktionen der Eingangssignale und Ausgangssignale des Systems sowie endlich vieler ihrer Ableitungen dargestellt [1]. Um diese Funktionen auswerten zu können, bietet sich die Verwendung von Ableitungsschätzverfahren an, um die unbekanntes Ableitungen der verrauschten Ausgangssignale zu bestimmen. In letzter Zeit wurde in diesem Zusammenhang die Verwendung des sog. „algebraischen“ Ableitungsschätzverfahrens diskutiert [2], [3]. In diesem Beitrag soll zunächst ein kurzer Vergleich des algebraischen Ableitungsschätzverfahrens mit dem renommierten Ableitungsschätzverfahren, welches auf Minimierung des mittleren quadratischen Fehlers der Schätzung basiert (Least Squares) [4], vorgenommen werden. Dabei wird zunächst ein aus der Schätztheorie linearer Modelle bekanntes Ergebnis wiederholt, dass nämlich die Least-Squares-basierte Schätzung für additives, weißes gaußsches Rauschen auf der sog. Cramér-Rao-Bound liegt und in diesem Sinne optimal ist. Weiterhin wird gezeigt, dass das algebraische Ableitungsschätzverfahren für eine optimale Parametereinstellung mit dem Least-Squares Verfahren zusammenfällt.

Als zweiter Teil des Beitrags wird für die Klasse der differentiell flachen Systeme [5] diskutiert, wie nach der Identifikation der Aktuatorfehler eine Akkommodation durchgeführt werden kann. Dabei wird davon ausgegangen, dass das System einer Trajektorienfolgeregelung zwischen zwei Ruhelagen unterworfen ist. Im Falle von Stellgrößenbeschränkungen sind der Akkommodation der Stellgröße Grenzen gesetzt. Dies führt für sprungförmige Aktuatorfehler zu einer Fehlerklassifikation in 3 Klassen [3]: „Akkommodierbare Fehler“ können mittels geänderter Vorsteuerung kompensiert werden, ohne dass eine Anpassung der Solltrajektorie vorgenommen werden muss. „Dynamisch schwere“ Fehler können nur dann kompensiert werden, wenn die Solltrajektorie zeitlich gestreckt wird, wenn also mehr Zeit für den Transfer zwischen den beiden Ruhelagen eingeplant wird. Für die Klasse der „schweren Fehler“ ist es notwendig, die ursprünglich geplante End-Ruhelage abzuändern. Abbildung 1 veranschaulicht diese Fehlerklassifizierung graphisch.



Alle Konzepte werden anhand eines Simulations-Beispiels verdeutlicht. In diesem Zusammenhang wird auch gezeigt, wie die vorgeschlagene Anpassung der Solltrajektorie im laufenden Betrieb durchgeführt werden kann.

Abbildung 1: Schematische Aufteilung des Raums der Ausgangsgrößen Y_1 und Y_2 in Erreichbarkeitszonen, wie sie sich als Folge von Aktuatorfehlern ergeben. Der linke Punkt entspricht dem Startpunkt der Solltrajektorie, alle anderen drei Punkte entsprechen potentiellen Endpunkten. Der erste Punkt kann trotz Fehler innerhalb der geplanten Transferzeit von 6 Sekunden erreicht werden („Akkommodierbarer Fehler“), der zweite Punkt kann erst in einer größeren Transferzeit als 6 Sekunden erreicht werden („Dynamisch schwerer Fehler“), der dritte Punkt kann gar nicht innerhalb der maximal zulässigen 12 Sekunden erreicht werden („Schwerer Fehler“).

Literatur:

- [1] R. Martínez-Guerra und S. Diop, Diagnosis of nonlinear systems using an unknown-input observer: an algebraic and differential approach, IEE Proc. Control Theory Appl., (1):130-135, 2004.
- [2] C. Join, H. Sira-Ramírez, M. Fliess, Control of an uncertain three-tank-system via on-line parameter identification and fault detection, IFAC World Congress on Automatic Control, IFAC, 2005,
- [3] P.Mai, C.Join, J.Reger, Flatness-based fault tolerant control of a nonlinear MIMO system using algebraic derivative estimation, Symposium of System Structure and Control (SSSC), Iguassu Falls, Brazil, 2007
- [4] S. Diop, J.W. Grizzle, P.E. Moraal, and A. Stefanopoulou, “Interpolation and Numerical Differentiation for Observer Design”, 1994 American Control Conference, Baltimore, 1994, pp. 1329–1333.
- [5] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon, 1995, Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples, Internat. J. Control, 61, 1327 – 1361.

LFT- und IQC Unsicherheitsmodellierung zur Stabilitätsanalyse und Synthese von Roboterregelungen

Matthias Löhning *

* Institut für Robotik und Mechatronik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Münchner Str. 20, 82234 Wessling
Tel. +49 (0)8153 28 2428
Fax +49 (0)8153 28 1441
Matthias.Loehning@dlr.de

Johann Bals**

** Institut für Robotik und Mechatronik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Münchner Str. 20, 82234 Wessling
Tel. +49 (0)8153 28 2433
Fax +49 (0)8153 28 1441
Johann.Bals@dlr.de

Schlüsselwörter: Robuste Regelung, H_∞ -Regelung, Zeitverhalten-Spezifikation, nichtlineare Stabilitätsanalyse, IQC Theorie, nichtlineare Unsicherheitsmodellierung.

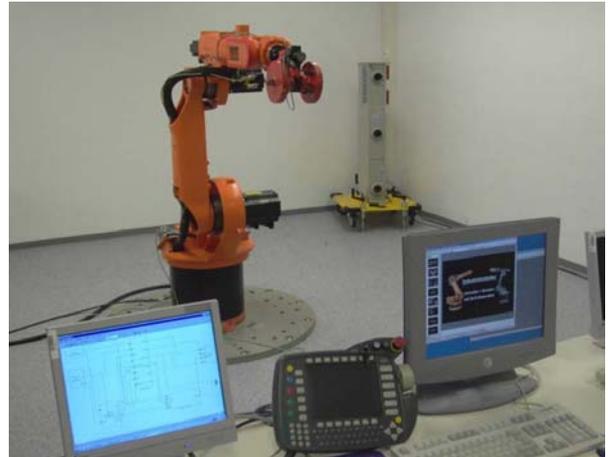
Eine Großzahl der an Industrierobotern erprobten Regelungskonzepte sind modellbasiert [1]. Der Einsatz dieser Klasse von Reglern ist aufgrund von ungenau bekannten Modellparametern (z.B. die Masse der Last), nichtlinearer unsicherer Reibungskennlinie und nichtlinearer Roboterkinematik problematisch. Aus diesem Grund werden in dieser Forschungsarbeit Unsicherheitsmodelle von Robotern entwickelt, darauf aufbauend robuste Regler entworfen und an der realen Anlage getestet.

Ausgangspunkt für die Unsicherheitsmodellierung ist ein Industrieroboter mit starren Strukturelementen und drei rotatorischen angetriebenen elastischen Gelenken. Die Parameter des Starrkörpermodells können mit festen Werten angenommen werden, jedoch müssen die Masse und Trägheitsmomente der Last vom Anwender festgelegt werden. Diese Daten sind meistens nur ungenau bekannt oder werden vom Anwender falsch spezifiziert. Die nichtlineare Reibung im Antriebsstrang kann mit einer dynamischen Unsicherheit modelliert werden. Dabei beinhaltet die Reibung neben der nichtlinearen Geschwindigkeitsabhängigkeit auch Unsicherheiten aufgrund von Temperaturabhängigkeiten. Die nichtlinearen Zusammenhänge durch Bewegungen der einzelnen Roboterglieder können als zeitvariante parametrische Unsicherheit interpretiert werden. Diese physikalisch basierten Modelle werden mit der Matlab LFR-Toolbox [2] in LFT Darstellung mit minimaler Ordnung gebracht. Das Reibmoment im Stillstand ergibt sich in der Realität aus der Summe der äußeren Momente, sodass die Kennlinie für Winkelgeschwindigkeiten $\omega = 0$ nicht eindeutig ist. Da bei sprungförmigen oder nicht eindeutigen Kennlinien die LFT Darstellung nicht angewendet werden kann, wird diese Art von Unsicherheit mithilfe der IQC (Integral Quadratical Constraints)-Theorie [3] mathematisch beschrieben. Dabei wird die nichtlineare Kennlinie durch konvexe Kombination von bereits bestehenden und einer neu implementierten IQC dargestellt [4].

Als Erstes wird ein H_∞ -Regler mit dem Mixed-Sensitivity-Verfahren [5] entworfen. Aufgrund der integralen Strecke und um asymptotisches Folgeverhalten trotz Störungen am Eingang der Strecke zu erhalten, muss das Standardverfahren verändert werden. Das Zeitverhalten wird mit regionaler Polvorgabe durch zusätzliche LMI's (Linear Matrix Inequalities) beeinflusst [6]. Robustheit wird mit

diesem Ansatz nur bezüglich unstrukturierten Unsicherheiten garantiert. Um bei obigen LFT-Modellen weniger konservative Ergebnisse zu erzielen, wird ein μ -Reglerentwurf [5] durchgeführt. Bei der Positionsregelung kann es im Zusammenspiel von integralen Reglern und Haftreibung zu Grenzyklen oder gar Instabilitäten kommen. Um die Stabilität der entworfenen Regler am reibungsbehafteten Roboter zu garantieren wird eine Analyse mithilfe der IQC Unsicherheitsmodelle durchgeführt. Gegenwärtig wird versucht die IQC Beschreibung in die Reglersynthese zu integrieren.

Zur Validierung werden die entworfenen Regler in der Simulation mit einem detaillierten nichtlinearen Modelica-Modell [8] und am realen Roboter getestet (siehe Abbildung 1). Beurteilt werden die Ergebnisse mit Positionssensoren auf der Motorseite und mithilfe einer 3D Kamera am Tool Center Point.



Literatur:

Abbildung 1: Roboterprüfstand am DLR

[1] Spong, Mark W.; S. Hutchinson; M. Vidyasagar: Robot Modeling and Control, 1 Auflage. Wiley, J., 2005.

[2] Hecker, S.: Generation of low order LFT-Representations for Robust Control Applications. Doktorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik and Informationstechnik der Technischen Universität München, 2006.

[3] Megretski, A.; A. Rantzer: System Analysis via Integral Quadratic Constraints. IEEE Transactions on Automatic Control, 42(6):819–830, 1997.

[4] Löhning, M.; J. Ruder; J. Bals: Robust stability analysis of a two-mass-spring system with IQCs. Submitted to 17th IFAC World Congress, Seoul, 2008.

[5] Raisch, J.; E.D. Gilles: Reglerentwurf mittels H_∞ -Minimierung - Eine Einführung. Automatisierungstechnik - at, 40(3):84–92, 1992.

[6] Chilali, M.; P. Gahinet: H_∞ Design with Pole Placement Constraints: An LMI Approach. IEEE Transactions on Automatic Control, 41(3):358–367, March 1996.

[7] Zhou, Kemin; John C. Doyle: Essentials of Robust Control. Prentice-Hall, Inc., 1998.

[8] Modelica-Homepage: <http://www.modelica.org/>

Methodisches Vorgehen zum Entwurf kontaktloser induktiver Übertragungssysteme und deren Regelung

Daniel Kürschner

Ulrich Jumar

Institut für Automation und Kommunikation e.V.
an der Otto von Guericke Universität Magdeburg
Steinfeldstrasse 3, 39179 Barleben
Tel.: +49 39203 810 30
daniel.kuerschner@ifak.eu

Institut für Automation und Kommunikation e.V.
an der Otto von Guericke Universität Magdeburg
Steinfeldstraße 3, 39179 Barleben
Tel.: +49 39203 810 20
ulrich.jumar@ifak.eu

Schlüsselwörter: kontaktlose Energieübertragung, Modellkopplung

Luftspaltbehäftete induktive Übertragungssysteme eröffnen Möglichkeiten für die Energieversorgung von beweglichen Verbrauchern und bieten sowohl im industriellen als auch im Gewerbe- oder Heimsektor oft signifikante Vorteile gegenüber bestehenden Systemen oder offenbaren gänzlich neue Lösungen. Doch gerade bei speziellen Anforderungen wie z.B. der Leistungsintegration oder der Einhaltung von Grenzwerten bezüglich des Streumagnetfeldes erweist sich eine iterative Synthese neuer Übertragungsanordnungen aufgrund ihrer komplexen Übertragungscharakteristik als überaus aufwendig. Im Gegensatz dazu würde eine mathematische Beschreibung einen theoretischen Entwurf ermöglichen und weiterhin parametrische Optimierungsprozesse schon während der Konzeptionsphase erlauben. Ein solcher modellbasierter Entwurf sowie die Anwendung von Regelungsalgorithmen erfordern die Kenntnis über die nichtlineare Wirkungsweise solcher gekoppelten Resonanzsysteme. Dieser Beitrag zeigt eine Methode des Entwurfes sowie Regelungsmöglichkeiten kontaktloser Resonanzübertrager mittels verkoppelter Beschreibungsmodelle.

Aufgrund der geringen magnetischen Kopplung zwischen Primär- und Sekundäreinheit infolge des konstruktionsbedingten Luftspaltes sind Maßnahmen zur Wirkungsgraderhöhung notwendig, um größere Leistungen bis in den Kilowattbereich übertragen und größere Luftspalte bis zu mehreren Dezimetern überbrücken zu können. Solche Maßnahmen sind die Erhöhung der Übertragungsfrequenz sowie die Verwendung von Ferritmaterialien [1]. Die Obergrenze für die Übertragungsfrequenz ist durch die physikalischen Eigenschaften solcher verfügbarer Materialien (z.B. Hystereseeffekte) und durch die Kenngrößen verfügbarer Halbleiterbauelemente gegeben. Das Erreichen hoher Übertragungsfrequenzen erfordert eine Kompensation der primär- und sekundärseitigen Streuinduktivitäten sowie einen resonanten Schaltbetrieb der leistungselektronischen Stellglieder. Dies wird durch einen beidseitigen Resonanzabgleich erreicht. Analog zum herkömmlichen Transformator hat sich auch für den luftspaltbehäfteten Übertrager die mathematische Beschreibung mittels des T-Ersatzschaltbildes bewährt. Dessen T-Parameter sind sowohl von den Materialeigenschaften als auch von den geometrischen Randbedingungen der Anordnung

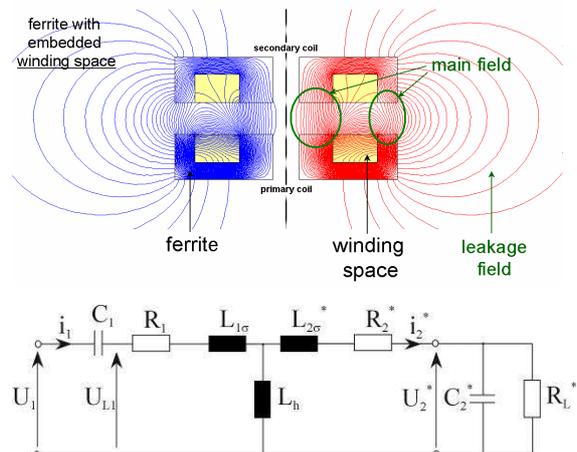


Abbildung 1: Vektorpotenziallinien (oben) und T-Ersatzschaltbild (unten) einer kontaktlosen Anordnung

abhängig und in der Regel durch große Streuinduktivitäten und kleine Hauptinduktivitäten charakterisiert. Der erste Entwurfsschritt, die Ermittlung der T-Parameter, erfordert aufgrund des anisotropen Mediums numerische Lösungsverfahren wie z.B. die Finite – Elemente – Methode für magnetostatische Probleme. Abbildung 1 (oben) zeigt die Simulationsergebnisse einer induktiven Übertragungsanordnung unter der Verwendung von handelsüblichen Halbschalenferriten. Dort bilden sich die Vektorpotenziallinien aufgrund der unterschiedlichen Permeabilitäten unterschiedlich dicht aus. Durch die Integration des Vektorpotenzials A in Richtung der speisenden Stromdichte sind der magnetische Fluss Φ in den Wickelfenstern und unter Kenntnis der Gesamtdurchflutung I anschließend die Koppelinduktivitäten $L_{1\sigma}$, $L_{2\sigma}$ und L_h bestimmbar.

$$\Phi = \oint \vec{A} \cdot d\vec{s} = \int_0^{2\pi} A_\varphi(r) \cdot r \cdot d\varphi \quad L_h = \frac{\Phi_2}{I_1} \quad L_{1\sigma} = L_{2\sigma} = \frac{\Phi_{1,12} - \Phi_{2,12}}{I_1}$$

Im zweiten Schritt kommt zur Bewertung des statischen und dynamischen Verhaltens der elektrischen Größen je nach Betrachtungsraum entweder die Laplace-transformierte des erweiterten T-Ersatzschaltbildes oder die Netzwerkanalyse zum Einsatz. Abbildung 2 zeigt die sekundärseitige Ausgangsspannung U_2 bei einer primärseitigen Serien- und einer sekundärseitigen Parallelkompensation. Der Betrag und die Phase von U_2 sind von den Windungszahlen, der Übertragungsfrequenz und von der sekundärseitigen Belastung abhängig. Das Übertragungsverhalten zeigt einen Übergang von einer auf zwei Resonanzüberhöhungen nahe der Resonanzfrequenz und unterliegt somit der Charakteristik einer Periodenverdopplung. Erst die Kenntnis dieser

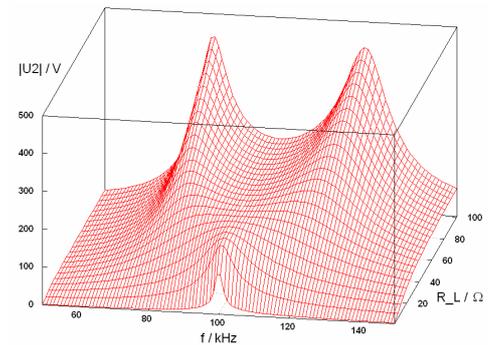


Abbildung 2: Sekundäre Ausgangsspannung bei Serien-parallel Kompensation

komplexen Wirkungsweise gekoppelter Resonanzsysteme sowie die Determinierbarkeit des spezifischen quantitativen Übertragungsverhaltens ermöglicht eine Dimensionierung des Übertragungssystems und erlaubt weiterhin eine Prognose über Toleranzketten. Die zusätzliche Notwendigkeit einer regelungstechnischen Verbesserung des dynamischen Betriebes induktiver Übertragungssysteme begründet sich aus der Tatsache, dass die oben gezeigten nichtlinearen Effekte innerhalb der Übertragungscharakteristik anstelle einer Frequenzänderung auch bei einer seitlichen Fehlpositionierung beider Spulenpaare zueinander, bei einer Luftspaltvariation oder aufgrund von Toleranzen innerhalb des Fertigungsprozesses auftreten können [2]. Eine solche Regelung der Ausgangsgrößen wird über PWM oder PDM-Verfahren, durch Frequenzstellung oder durch kombinierte Stellverfahren im Einspeisewechselrichter realisiert und setzt als Besonderheit luftspaltbehafteter Systeme eine kontaktlose Signalführung zum primärseitigen Stellglied voraus. Eine Lösungsmöglichkeit ist die Rückführung über einen separaten Datenkanal welcher zu Gunsten der Störuneempfindlichkeit ebenso induktiv ausgeführt und welcher zur eindeutigen Identifikation sowie zur Bestimmung der Absolutposition des Sekundärteils genutzt wird.

Literatur:

- [1] Mecke, R.; Rathge, C.; Fischer, W.; Andonovski, B.: Analysis of inductive energy transmission systems with large air gap at high frequencies. European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse 2003
- [2] Schulze, E: 3D-Magnetfeldsimulation für die kontaktlose Energie- und Datenübertragung in mechatronischen Systemen. Diplomarbeit, O.-v.-G.-Universität Magdeburg, 2007

Entwicklung eines Lasertrackersystems zur berührungslosen Positionsbestimmung in mechatronischen Systemen

Christian Wachten*, Lars Friedrich*,
Claas Müller*, Holger Reinecke*

* Lehrstuhl für Prozesstechnologie /
Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK)
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Georges-Köhler-Allee 078
79110 Freiburg
Telefon: 0761 / 203-7304
Fax: 0761 / 203-7352
E-Mail: wachten@imtek.de

Christoph Ament**

** Fachgebiet Systemanalyse /
Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik
Technische Universität Ilmenau
Gustav-Kirchhoff-Straße 1
98684 Ilmenau
Telefon: 03677 / 69-2815
Fax: 03677 / 69-1434
E-Mail: christoph.ament@tu-ilmenau.de

Schlüsselwörter: Lasertrackersystem, direkte TCP-Vermessung, adaptiver PI Regler mit μ C, absolute Abstandsschätzung, Online-Parameteranpassung

Lasertrackersysteme sind 3D-Messsysteme [1], die es ermöglichen, geometrische Positionen großer Bauteile oder Maschinen hochgenau zu messen. Hierfür wird ein im Messvolumen befindlicher Retroreflektor durch einen Laserstrahl verfolgt. Kommerziell verfügbare Systeme sind sehr kostenintensiv und eignen sich aufgrund der Messrate, ihrer Größe und ihrem Gewicht nur begrenzt zur Integration in dynamischen, mechatronischen Systemen. Sie sind primär als Stand-Alone-Messsysteme konzipiert.

Oftmals besitzen Roboter und Werkzeugmaschinen eine nicht mehr tolerierbare Positionierungsunsicherheit des Tool Center Point (TCP) aufgrund von kinematischen und messtechnischen Effekten. Das hier vorgestellte, neuartige und kostengünstige Lasertrackersystem kann berührungslos und unabhängig vom mechanischen Kraftfluss die Position des TCP vermessen. Gelenkspiele und elastische Verformungen lassen sich dadurch vollständig kompensieren. Damit sind innovative, kinematische Konzepte zur Werkzeugführung denkbar, die die bewegten Massen reduzieren und als Folge davon die Dynamik erhöhen. Durch das zu Grunde liegende Baukastenprinzip des Lasertrackersystems kann darüber hinaus die Genauigkeit den Erfordernissen des Endanwenders angepasst werden.

Abbildung 1 zeigt das Funktionsprinzip des Lasertrackersystems.

Ein HeNe-Laser emittiert zwei Laserstrahlen mit leicht verschiedenen Frequenzen f_1 und f_2 . Diese Strahlen werden in einem Interferometer in einen Referenzstrahl f_2 und einen Messstrahl f_1 aufgespaltet. Der Messstrahl verlässt das Interfero-

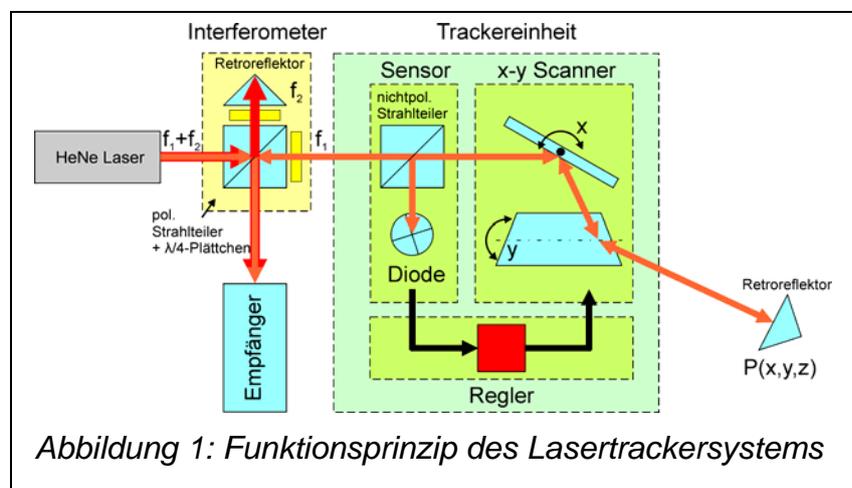


Abbildung 1: Funktionsprinzip des Lasertrackersystems

meter und wird durch die Spiegel des Aktors (Galvanometerscanner) auf einen Reflektor im Raum abgelenkt. Der Reflektor besitzt die besondere Eigenschaft, dass das einfallende Licht in diejenige Richtung reflektiert wird, aus der es gekommen ist. Auf dem Rückweg wird ein Teil des Laserstrahls auf einen Quadrantendetektor abgelenkt, dessen analoge Ausgänge mit einem Regler verbunden sind. Der Regler generiert Stellsignale für den nachfolgenden Galvanometerscanner. Ziel ist die Regelung des Laserstrahls auf das Zentrum des Quadrantendetektors durch Drehung der Spiegel. Darüber hinaus wird ein Teil des reflektierten Laserstrahls mit dem Referenzstrahl im Interferometer überlagert, um die relative Längenänderung einer Bewegung des Retroreflektors messen zu können. Durch eine komplexe direkte Kinematik kann durch die Messung der Spiegelwinkel und der Längenänderung die Position des Reflektors berechnet werden. Eine nachfolgende High-Speed-Signalverarbeitung übernimmt das Auslesen der Sensoren bzw. des Interferometers und die Transformation der Messwerte in kartesische Koordinaten.

Um einen optimalen Regler für das System auslegen zu können, werden lineare Modelle des Aktors und des Quadrantendetektors entwickelt und die Modellparameter identifiziert. Die Dynamik der Strecke hängt maßgeblich von der Entfernung zwischen Sensor und Retroreflektor ab. Die optimale Systemdynamik wird erreicht, indem die Reglerparameter während des Betriebs automatisch angepasst werden. Hierzu wird eine Methode entwickelt, um den absoluten Abstand zwischen Messsystem und Reflektor durch Schwingungseinkopplung zu schätzen.

Abbildung 2 zeigt die praktische Umsetzung des Reglers. Der Regler wird als analoger PI-Regler [2] realisiert, dessen Verstärkung über digitale Potentiometer eingestellt wird. In einem Mikrocontroller werden die Ansteuerung der Potentiometer und der Algorithmus zur absoluten Abstandsschätzung für die Einstellung der Reglerkennwerte implementiert. Des Weiteren wird beim Hochfahren des Lasertrackersystems und bei Strahlverlust der analoge Schaltungsteil übersprochen und der Aktor nur durch den Digitalteil gesteuert, um den Retroreflektor im Raum definiert zu suchen.

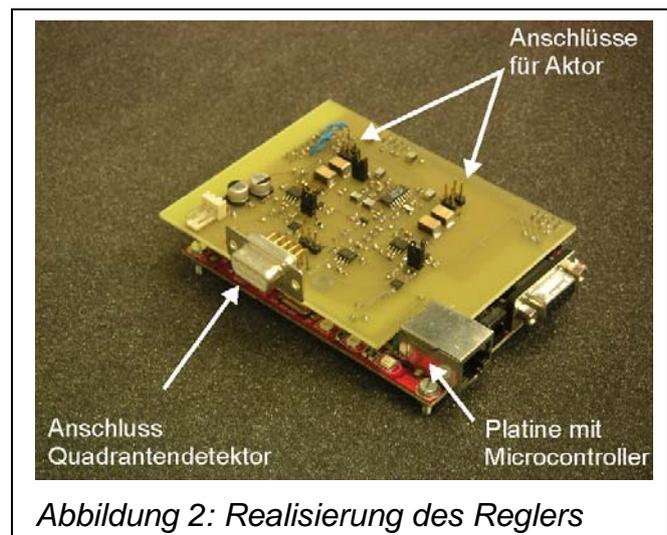


Abbildung 2: Realisierung des Reglers

Experimente haben gezeigt, dass eine laterale Verfahrensgeschwindigkeit des Retroreflektors von bis zu 2.5 m/s bei unbegrenzter Beschleunigung erzielt werden kann. Darüber hinaus konnten bei radialen Entfernungen zwischen 0.5 m und ca. 8 m keine Nachführprobleme festgestellt werden.

Literatur:

- [1] M. Riemensperger und R. Gottwald, „Kern Smart 310 – Leica’s approach to high precision 3D coordinate determination“, 2. International Workshop on Accelerator Alignment, Hamburg, 1990, 182-200
- [2] O. Föllinger, *Regelungstechnik*, Hüthig GmbH, Heidelberg, 1994

Anwendung der modellbasierten prädiktiven Regelung zur Gradient-Freeze- Halbleitereinkristallzüchtung auf der ISS

Konstantin Hermann und Andreas Rehkopf

Institut für Automatisierungstechnik
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Lessingstraße 45
Tel.: 03731 - 39 3286
Fax: 03731 - 39 3481

E-Mail: Konstantin.Hermann@aut.tu-freiberg.de Andreas.Rehkopf@aut.tu-freiberg.de

Schlüsselwörter: Einkristallzüchtung, Prädiktive Regelung, Identifikation

Durch die ständig wachsenden Anforderungen an die Mikroelektronik erhöht sich auch der Integrationsgrad (Packungsdichte) der Bauelemente. Hierfür sind versetzungsarme, homogene, physikalisch und chemisch definierte Einkristalle mit immer größer werdendem Querschnitt notwendig. Mit der Grundlagenforschung im Weltall (Internationale Raumstation ISS) sollen die Eigenschaften von Halbleiterkristallen verbessert werden. Ziel der Experimente in der Schwerelosigkeit ist es, grundlegende Untersuchungen zur Beeinflussung von Kristallisationsprozessen durchzuführen, die auf der Erde von unerwünschten schwerkraftabhängigen Effekten überlagert werden. Die Ergebnisse sollen Rückschlüsse für neue Technologien auf der Erde zur gezielten Beeinflussung der Eigenschaften von Halbleitermaterialien gewonnen werden.

Das Wesen der Gradient-Freeze-Technik ist das Wandern der Kristallisationsfront in einem Züchtungscontainer mit vorgegebener Wachstumsgeschwindigkeit. Dabei werden an die Automatisierungstechnik hohe Forderungen gestellt. Dies ist durch die Gewährleistung eines exakten Temperaturregimes beim Ankeimen und während der Züchtung begründet, welches die Durchführbarkeit eines zeitaufwendigen Züchtungsprozesses voraussetzt.

In dem vorliegenden Beitrag wird die Anwendung einer modellbasierten prädiktiven Regelung in einer Gradient-Freeze-Anlage (GF-Anlage) für die ISS vorgestellt. Wegen der geringen Dynamik von thermischen Prozessen einerseits sowie der rasanten Entwicklung der Rechentechnik andererseits ist die vergleichsweise speicher- und rechenaufwändige Regelungsart gut realisierbar.

Die modellbasierte prädiktive Regelung bietet gegenüber den konventionellen Regelstrategien einen wesentlichen Vorteil: basierend auf einem mathematischen Modell, das als Ergebnis der Identifikation vorliegt [1], kann das zukünftige Anlagenverhalten in gebotener Präzision „vorhergesagt“ und aufgrund dieser Vorhersage eine optimale Stellgrößenfolge berechnet werden. Das Grundkonzept der hier zum Einsatz kommenden prädiktiven Regelstrategien basiert unter anderem auf den Literaturquellen [2], [3] und [4].

Die Qualität des prädiktiven Reglers ist in besonderem Maße von der Güte des zugrunde liegenden Modells abhängig. Die erzielten Ergebnisse lagen im Rahmen der Erwartungen. Die verwendete Automatisierungsstruktur ist in der Abbildung 1 dargestellt.

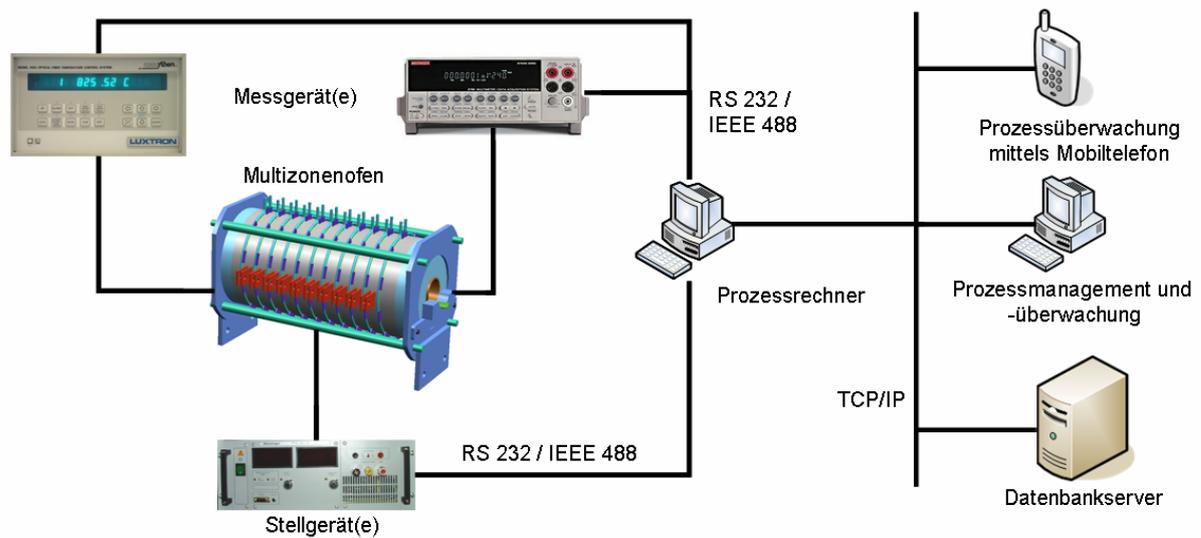


Abbildung 1: Automatisierungsstruktur der GF - Kristallzuchtungsanlage

Literatur:

- [1] K. Hermann, A. Rehkopf, H. Sauermann: Betrachtungen zur Identifikation einer Gradient-Freeze-Anlage zur Einkristallzuchtung, at – Automatisierungstechnik 54, S. 566-573, 2006
- [2] J. A. Rossiter: Model-based predictive control: A Practical Approach, CRC Press, 2003
- [3] R. Dittmar, B.-M. Pfeiffer: Modellbasierte prädiktive Regelung – Eine Einführung für Ingenieure, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2004
- [4] R. Pickhardt: Modellgestützte prädiktive Regelverfahren und ihre praktische Anwendung, Habilitationsschrift, Shaker Verlag, 2002