

41. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

21.-23. FEBRUAR 2007

Programm und Kurzfassungen

Mittwoch, 21. Februar 2007

Nachmittags **Anreise**
18:30 **Abendessen** im Bellevue Rheinhotel

Donnerstag, 22. Februar 2007

08:45 – 09:00 **Eröffnung und Begrüßung (Raum 1)**
Prof. Dr.-Ing. B. Tibken

Raum 1		Raum 2	
09:00 – 10:30	Optimierung Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Pu Li	Manipulatoren Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Klaus C. Dietmayer	
09:00 – 09:30	Ermittlung von optimalen Sollwerten für geschlossene Regelungssysteme unter Berücksichtigung unsicherer Prozesseinflüsse <i>Thomas Flemming (Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik, Technische Universität Ilmenau, Gr. 15)</i>	Visuelle Bewegungsschätzung für den humanoiden Roboter Asimo <i>Volker Willert (Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Darmstadt, Gr. 7)</i>	
09:30 – 10:00	Aspects of Optimal Hybrid Control <i>Sid Ahmed Attia (Fachgebiet Regelungssysteme, Technische Universität Berlin, Gr. 2)</i>	A Global Planner for the Manipulator Motion Planning by using Cartesian Space <i>Darko Ojdanić (Institut für Automatisierungstechnik, Universität Bremen, Gr. 5)</i>	
10:00 – 10:30	Automatische Differentiation zur Optimierung mechatronischer Systeme am Beispiel einer Parallelkinematik <i>Eckehard Münch (Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, Universität Paderborn, Gr. 22)</i>	Design, Regelung und Bewertung von kinästhetischen haptischen Eingabegeräten <i>Marc Ueberle (Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Technische Universität München, Gr. 21)</i>	

10:30 – 11:00 **Kaffee-/Teepause**

Raum 1		Raum 2	
11:00 – 12:30	Verteilte Systeme Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. O. Sawodny	Fahrzeuge Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. A. Gräser	
11:00 – 11:30	Synthese Verteilter Sicherheitssteuerungen <i>Dirk Missal (Lehrstuhl Automatisierungstechnik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Gr. 3)</i>	Random Finite Set Theorie zur Multiobjektverfolgung mit unsicheren und mehrdeutigen Messdaten <i>Mirko Mählich (Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Gr. 19)</i>	
11:30 – 12:00	Flachheitsbasierte Steuerungs- und Regelungsstrategien für Wärme- und Stoffübertragungsprozesse <i>Alexander Kharitonov (Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Gr. 26)</i>	Ein Konzept zur aktiven Schwingungsdämpfung von Schienenfahrzeug-Wagenkästen <i>C. Benatzky (Institut für Mechanik und Mechatronik, Abteilung für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung, Technische Universität Wien, Gr. 28)</i>	

41. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

21.-23. FEBRUAR 2007

12:00 – 12:30	Verteilte Verarbeitung industrieller Prognose- und Ursachenanalysemodelle <i>Mario Thron (Institut für Automatisierungstechnik, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Gr. 20)</i>	Möglichkeiten zur Verbesserung der Klopfregelung in zylinderdruckgeführten Motorsteuerungen <i>Ulf Lezius (Inst. für Automatisierungstechnik, Universität Rostock, Gr. 23)</i>
---------------	---	---

12:30 – 14:00 Mittagessen / Pause

14:00 – 16:00	Regelung I Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. S. Engell	Modellbildung Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. A. Kugi
14:00 – 14:30	Entwurf von Impedanzverhalten zur beidhändigen Manipulation <i>Thomas Wimböck (Institut für Robotik und Mechatronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Gr. 30)</i>	Modellbasierte Fehlererkennung und Fehlerdiagnose für große zyklische ereignisdiskrete Systeme <i>Matthias Roth (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, Technische Universität Kaiserslautern, Gr. 16)</i>
14:30 – 15:00	Restringierte Level-Set-Evolutionen für die deflektometrische Oberflächenrekonstruktion <i>Jonathan Balzer (Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Universität Karlsruhe (TH), Gr. 18)</i>	Verzahnungen von modellbasiertem Reglerentwurf und modellbasierter Softwareentwicklung <i>Andreas Polzer (Lehrstuhl für Software für eingebettete Systeme, RWTH Aachen, Gr. 1)</i>
15:00 – 15:30	Optimierende Regelung von SMB Prozessen <i>Achim Küpper (Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik, Universität Dortmund, Gr. 8)</i>	Modellierung und Regelung zur Unterdrückung des Skieffektes beim Grobblechwalzen <i>Thomas Kiefer (Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes, Gr. 24)</i>
15:30 – 16:00	Regelung von Schwingungsprüfständen mittels Iterativ Lernender Regelungen im Frequenzbereich <i>Hellmar Rockel (Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Darmstadt, Gr. 14)</i>	Modellierung einer Gummispritzpresse mit einem temperaturgeregelten Einspritzprozess <i>Ulf Kreuzer (Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr München, Gr. 21)</i>

16:00 – 16:30 Kaffee-/Teepause

16:30 – 18:00 Plenarvortrag

Eric Rogers (University of Southampton)
Krzysztof Galkowski (University of Zielona Gora, Poland, currently Gerhard-Mercator-Guest Professor at University of Wuppertal)

Iterative learning control --- algorithms, robustness and experimental verification

18:30 Abendessen

41. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

21.-23. FEBRUAR 2007

Freitag, 23. Februar 2007

08:30 – 10:00	Regelung II Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. J. Lunze	UML Sitzungsleitung: Prof. Dr. techn. K. Janschek
08:30 – 09:00	Optimale Betriebsführung von Mini-Brennstoffzellen <i>Jens Niemeyer (Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe (TH), Gr. 18)</i>	Leistungsanalyse von Systementwürfen mittels UML und Generalisierten Netzen <i>Evelina Koycheva (Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden, Gr. 9)</i>
09:00 – 09:30	Rekonfiguration von Regelkreisen nach Aktorausfällen <i>Jan H. Richter (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Gr. 3)</i>	Durchgängige Anforderungs-, System- und Testfallbeschreibung mit UML <i>Volker Knollmann (Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Gr. 4)</i>
09:30 – 10:00	LPV Gain Scheduling – Modellierung und Reglerentwurf am Beispiel der Füllungsregelung eines Ottomotors <i>A. Kwiatkowski (Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Hamburg Harburg, Gr. 13)</i>	Lokale Neuro-Fuzzy-Netze für Mikrokontroller in Festkomma-Arithmetik <i>Oliver Bänfer (Institut für Mechanik und Regelungstechnik – Mechatronik, Arbeitsgruppe Mess- und Regelungstechnik, Universität Siegen, Gr. 25)</i>

10:00 – 10:30 Kaffee-/Teepause

10:30 – 12:00	Nichtlineare Regelungssysteme Sitzungsleitung: o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. K. Schlacher	Agenten Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. B. Vogel-Heuser
10:30 – 11:00	Ermittlung des Schwimmwinkels mittels Extended Kalman-Filter auf Basis eines nichtlinearen Modells der Längs- und Querdynamik <i>Anne von Vietinghoff (Institut für Industrielle Informationstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Gr. 18)</i>	Mobile Agenten für den Fernzugriff auf eingebettete Systeme <i>Josef Renner (Professur Prozessautomatisierung, TU Chemnitz, Gr. 6)</i>
11:00 – 11:30	Zur Dynamik und Regelung eines PEM-Brennstoffzellensystems <i>Michael A. Danzer (Institut für Meß-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Gr. 27)</i>	Agentenorientierten Softwareentwicklung für flexible und verlässliche eingebettete Echtzeitsysteme im Maschinen und Anlagenbau <i>Andreas Wannagat (Eingebettete Systeme, Universität Kassel, Gr. 29)</i>
11:30 – 12:00	Port-Hamilton'sche Systeme für die Regelung nicht-linearer Systeme <i>Richard Stadlmayr (Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung, Universität Linz, Gr. 12)</i>	Kognitive technische Systeme: Automatisierungstechnische Beispiele zur lernfähigen 'Regelung' und zur Bedienerüberwachung <i>Elmar Ahle (Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik, Universität Duisburg-Essen, Gr. 11)</i>

12:00 – 12:30 Abschluss / Preisverleihung / Aufruf für Boppard 2008

12:30 – 13:30 Mittagessen

13:30 Ende des Kolloquiums

Visuelle Bewegungsschätzung für den humanoiden Roboter Asimo

Volker Willert

November 3, 2006

Möchte man ein Bildverarbeitungssystem für einen humanoiden Roboter entwerfen, das wenigstens ansatzweise die kognitiven Fähigkeiten eines Menschen besitzt, muß man in der Lage sein, die zeitlichen Veränderungen in einem Videosignal zu analysieren. Die Grundlage dafür besteht in einer robusten Abschätzung der einzelnen Bildpunktbewegungen, der Berechnung des sogenannten optischen Flusses. Nur mit einer verlässlichen und genauen Geschwindigkeitsabschätzung lassen sich weiterführende Aufgaben, wie das Verfolgen von Objekten und das Erkennen von charakteristischen Bewegungsmustern, wie beispielsweise eine Unterscheidung zwischen einem laufenden und einem rennenden Menschen, bewerkstelligen.

Das Grundproblem bei der Abschätzung von Bildpunktbewegungen liegt im Finden einer eindeutigen Zuordnung von Grauwertmustern zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern einer Bildsequenz. Diese Zuordnung ist aufgrund uneindeutiger Struktur der Grauwertmuster oftmals mit Mehrdeutigkeit behaftet. Durch geeignete beschränkende Annahmen an die Bewegung und an die raumzeitliche Zusammengehörigkeit der einzelnen Geschwindigkeitsmessungen, lassen sich diese Mehrdeutigkeiten auflösen.

In dieser Arbeit wird eine probabilistische Integrationsmethode, basierend auf der Bayeschen Inferenz, vorgestellt, um Bildpunktbewegungen abzuschätzen. Im Gegensatz zu Systemen, die Erweiterungen des Kalman-Filters benutzen, arbeitet dieses System mit beliebig diskret verteilten Dichtefunktionen und berücksichtigt zudem die räumliche Kohärenz von benachbarten Bildpunkten. Es beinhaltet eine allgemeine, fehlertolerante und beleuchtungsinvariante Messmethode, die auch zur Tiefenabschätzung benutzt werden kann. Das System weist in vielen Aspekten neurophysiologisch plausibles Verhalten auf und ist in Echtzeit einsetzbar.

Mögliche Anwendungen des Systems sind nicht auf humanoide Roboter beschränkt, sondern reichen von der Bilddatenkompression bis zum Einsatz in Fahrerassistenzsystemen.

References

- [1] V. Willert, J. Eggert, J. Adamy, E. Körner: Non-Gaussian Velocity Distributions Integrated over Space, Time, and Scales, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B*, vol. 36, no. 3, pp. 482-493, Jun. 2006.
- [2] V. Willert, J. Eggert, S. Clever, E. Körner: Probabilistic Color Optical Flow, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3663, pp. 9-16, Sep. 2005.
- [3] V. Willert, J. Eggert, J. Adamy, R. Stahl, E. Körner: A Probabilistic Model for Binaural Sound Localization, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B*, vol. 36, no. 5, pp. 982-994, Okt. 2006.
- [4] P. Bayerl, H. Neumann: Disambiguating Visual Motion through Contextual Feedback Modulation, *Neural Computation*, vol. 16, no. 10, pp. 2041-2066, 2004.
- [5] P. Burgi, A.L.Yuille, N.M. Grzywacz: Probabilistic Motion Estimation Based on Temporal Coherence, *Neural Computation*, vol. 12, pp. 1839-1867, 2000.
- [6] T. Brox, A. Bruhm, N. Papenberg, J. Weickert: High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Warping, *Proc. 8th European Conference on Computer Vision*, vol. 3024, pp. 25-36, Prag, Tschechien 2004.

Entwurf von Impedanzverhalten zur beidhändigen Manipulation

Thomas Wimböck

Institut für Robotik und Mechatronik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Münchner Str. 20, 82234 Oberpfaffenhofen
Tel: 0 8153 28 11 83
Fax: 0 81 53 28 11 34
Email: thomas.wimboeck@dlr.de

Schlüsselwörter: Impedanzregelung, Beidhändige Manipulation

Seit Jahrzehnten werden anthropomorphe Roboterarme und -hände entwickelt. In vielen Fällen wurden diese Systeme allerdings getrennt voneinander entworfen. Geeignete Regler wurden deshalb oftmals nur für die einzelnen Teilsysteme untersucht, während die koordinierte Regelung von der Fingerspitze bis zur Basis eines kombinierten Hand-Arm Systems bisher nur wenig betrachtet wurde.

Es muss berücksichtigt werden, dass Arme und Hände sehr unterschiedlich sind: Arme können als serielle kinematische Ketten mit hohen maximalen Gelenkmomenten, einem großen Arbeitsraum und großer Massenträgheit beschrieben werden. Demgegenüber stehen Roboterhände, die aus mehreren kooperierenden Robotern (Finger) bestehen und vor allem durch ihre geringe Massenträgheit und ihren limitierten Arbeitsraum charakterisiert sind.

Am DLR e.V. wurde im Mai 2006 ein humanoider Oberkörper namens Justin vorgestellt [1], der über einen beweglichen Rumpf (3 Fhg¹), zwei Arme (jeweils 7 Fhg) und zwei Hände (jeweils 12 Fhg) verfügt (siehe Abb. 1).

Eine Bewegungsplanung für ein solches Gesamtsystem mit 41 Freiheitsgraden auf Gelenkebene ist sehr rechenaufwendig. In dieser Arbeit wird daher basierend auf dem wohl bekannten passivitätsbasierten Regelgesetz²

$$\tau = g(\theta) - \left(\frac{\partial V(\theta)}{\partial \theta} \right)^T - D(\theta)\dot{\theta}$$

die Potentialfunktion $V(\theta)$ derartig entworfen, dass Kommandos auf hoher Abstraktionsebene ermöglicht werden. Gewünschte Objektbewegungen oder Steifigkeitsverhalten können dann auf Objektebene definiert werden, so dass die Aufgabenplanung vereinfacht wird. Die Potentialfunktion $V(\theta)$ wird als Überlagerung von mehreren positiv semidefiniten Steifigkeitspotentialen gewählt. Somit ist $V(\theta)$ ebenfalls

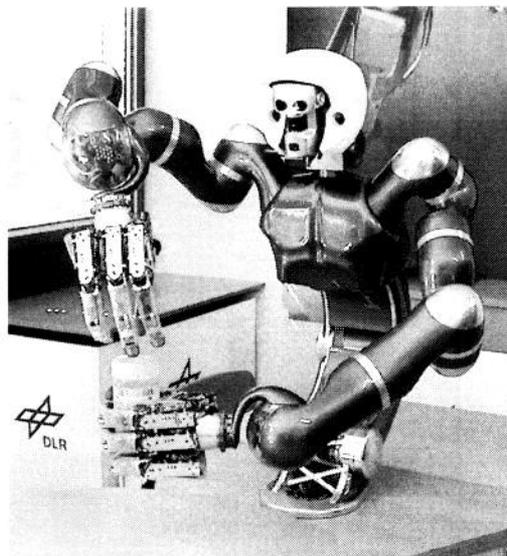


Abbildung 1: DLRs Justin

¹ Fhg: Freiheitsgrad(e)

² Mit: Gelenkmoment τ , Gelenkwinkel θ , Gewichtsbeitrag des Roboters $g(\theta)$ und pos. semidefinite Gelenkdämpfungsmatrix $D(\theta)$

positiv semidefinit und zusammen mit den Bewegungsgleichungen des Roboters kann Passivität des geschlossenen Regelkreises gezeigt werden [2]. In Abb. 2 sind die aus $V(\theta)$ resultierenden virtuellen Steifigkeiten dargestellt. Basierend auf der Stellung der Fingerspitzen wird ein virtuelles Koordinatensystem für jede Hand definiert [3]. Entlang der Verbindungslinien zwischen diesen Koordinatensystemen und den Fingerspitzen können mit Hilfe von eindimensionalen Steifigkeiten (schwarz) interne Kräfte zum Greifen spezifiziert werden. Durch die virtuelle Ruhelage des Relativkoordinatensystems zwischen den virtuellen Koordinatensystemen der Hände kann die relative Lage der Hände im Raum festgelegt werden. Über die Kopplungssteifigkeit K_c können interne Kräfte zwischen den Armen definiert werden, die auf ein mit beiden Händen gegriffenes Objekt ausgeübt werden. Um die Objektlage im Raum zu fixieren, wird das Koordinatensystem $H_o(\theta)$ als Funktion der virtuellen Koordinatensysteme der Hände berechnet. Objektbewegungen können durch Änderung der Ruhelage des Objektkoordinatensystems $H_{o,d}$ generiert werden. Mit der räumlichen Steifigkeit K_o kann das Steifigkeitsverhalten auf Objektebene definiert werden. Die erzeugten virtuellen Kräfte werden über die korrespondierende transponierte Jakobimatrix auf Gelenkmomentenebene transformiert. Aufgrund des unterschiedlich großen Arbeitsraums von Händen und Armen wird zudem ein Nullraumkriterium dem Regelgesetz unterlagert, dass die Gelenkwinkel von ihren Gelenkgrenzen fernhält.

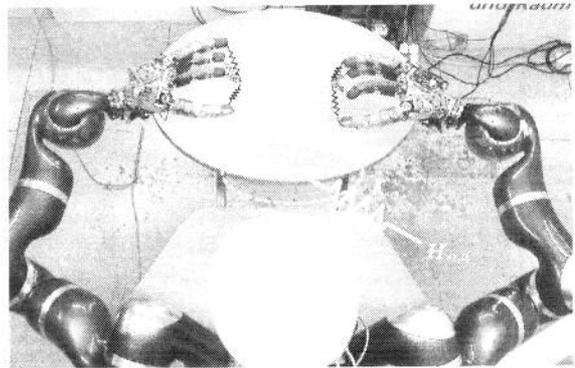


Abbildung 2: Virtuelle Steifigkeiten

Das vorgeschlagene Impedanzverhalten wurde beispielhaft für das Aufschrauben einer Dose (vgl. Abb. 1) und das beidhändige Bewegen einer kleinen Box implementiert.

Literatur:

- [1] Ch. Ott, O. Eiberger, W. Friedl, B. Bäuml, U. Hillenbrand, Ch. Borst, A. Albuschäffer, B. Brunner, H. Hirschmüller, S. Kielhöfer, R. Konietschke, M. Suppa, T. Wimböck, F. Zacharias, and G. Hirzinger, *A humanoid two-arm system for dexterous manipulation*, in *Humanoids 2006*, 2006.
- [2] W. Khalil and E. Dombre, *Modeling, Identification & Control of Robots*, Hermes Penton Science, 2002.
- [3] T. Wimböck, Ch. Ott, and G. Hirzinger, *Passivity-based object-level impedance control for a multifingered hand*, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006.

Restringierte Level-Set-Evolutionen für die deflektometrische Oberflächenrekonstruktion

Jonathan Balzer

Institut für Technische Informatik,
Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme
Universität Karlsruhe (TH)
Adenauerring 4, 76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 – 608 5916
Fax: 0721 – 608 5926
eMail: jonathan.balzer@ies.uni-karlsruhe.de

Schlüsselwörter: Deflektometrie, Level-Set-Evolutionen, spiegelnde Oberflächen, 3D-Rekonstruktion, inverse Probleme

Zahlreiche klassische Verfahren der automatischen Sichtprüfung versagen auf spiegelnden bzw. teilspiegelnden Prüfobjekten, weil nicht die Oberfläche selbst, sondern die Reflexion der umgebenden Szene betrachtet wird. Jedoch lässt sich die Kenntnis des bei der gekoppelten

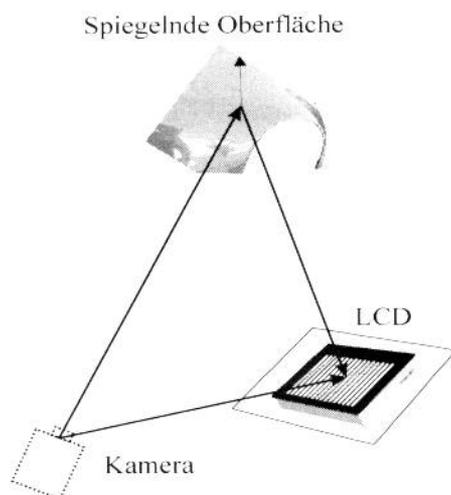


Abbildung 1: Deflektometrisches Messprinzip

Abbildung erfüllten Reflexionsgesetzes ausnutzen: Ausgangspunkt der sogenannten deflektometrischen Messverfahren ist die Kodierung der über die Spiegelfläche betrachteten Merkmale, die üblicherweise mit Hilfe eines LCD-Monitors oder Projektors realisiert wird. Jedem Kamerapixel kann so die Lage seiner Beleuchtungsquelle im Raum zugeordnet werden (s. Abbildung 1).

Robustheit und hoher Messempfindlichkeit steht die mathematische Schlechtgestelltheit des inversen Problems der Oberflächenrekonstruktion gegenüber. Die Lösungsmannigfaltigkeit ist in Form eines konservativen Gradientenfelds oder äquivalent eines Vektorfelds möglicher Oberflächennormalen gegeben. Da keine Randbedingungen bekannt sind und Nichtlinearitäten auftreten, kann eine eindeutige Lösung nur durch Auswertung von Zusatzinformation erhalten werden, siehe zum Beispiel [1], [2], [3], [5] und [7].

Wir formulieren die Rekonstruktionsaufgabe in diesem Beitrag als Optimierungsproblem: Hierbei wird eine Anfangsfläche iterativ einer homöomorphen Transformation („elastischen Verzerrung“) unterzogen dahingehend, dass diese im stationären Zustand ein auf ihr definiertes, regularisierendes Funktional minimiert. Zu jedem Zeitpunkt soll Integration das gesuchte Potentialfeld liefern (siehe zum Beispiel Abbildung 2). Dies geschieht mit Hilfe eines Gradientenprojektionsverfahren: Von einem „Startwert“ bewegt man sich in Richtung des steilsten Abstiegs des Funktionals im Vektorraum der regulären Flächen projiziert auf die von der Nebenbedingung induzierte Untermannigfaltigkeit. Eine Verallgemeinerung des Gradientenbegriffs ist damit unabdingbar. Unter gewissen Stetigkeitsanforderungen erreicht man so ei-

nen „kritischen Punkt“, in dem bei geschickter Wahl des Funktionals auch das gesuchte Minimum vorliegt.

Die implizite Repräsentation der Fläche als Level-Set (Urbild der „Niveaulinien“) einer stetigen Funktion erweist sich bei dieser Vorgehensweise als vorteilhaft: Größen der inneren Geometrie sind übersichtlich in ihrer analytischen Darstellung. Komplexe Vorgänge wie topologische Änderungen sind – anders als bei expliziter Parametrisierung – ohne größere Schwierigkeiten implementierbar. Ein kurzer Einblick in die Theorie dynamischer, impliziter Flächen wird gegeben. Eine detaillierte Behandlung der fundamentalen Level-Set-Gleichung und entsprechender numerischer Lösungsmethoden findet sich beispielsweise in [6].

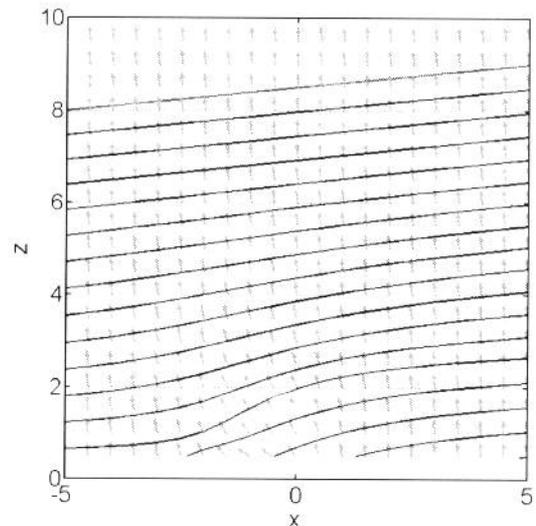


Abbildung 2: Oberflächen evolution unter Normalenfeld-Nebenbedingung (Startwert rot gekennzeichnet)

Exemplarisch werden zur Regularisierung Daten aus der Messung des optischen Flusses hinzugezogen. Dieser ist definiert als das Vektorfeld der scheinbaren Verschiebungen von Bildpunkten infolge geometrischer Änderung der Szene. Zunächst wird eine drastische Verallgemeinerung des von Roth und Black vorgeschlagenen Modells [4] für die Verschiebungsraten virtueller Merkmale im Kamerabild vorgestellt. Minimiert wird dann die Abweichung zwischen prädiiziertem und tatsächlichem optischen Fluss. Abschließend präsentieren wir mit Hilfe einer MATLAB-Toolbox simulierte, iterative Rekonstruktionen, die die Praktikabilität des Ansatzes unterstreichen.

Zunächst wird eine drastische Verallgemeinerung des von Roth und Black vorgeschlagenen Modells [4] für die Verschiebungsraten virtueller Merkmale im Kamerabild vorgestellt. Minimiert wird dann die Abweichung zwischen prädiiziertem und tatsächlichem optischen Fluss. Abschließend präsentieren wir mit Hilfe einer MATLAB-Toolbox simulierte, iterative Rekonstruktionen, die die Praktikabilität des Ansatzes unterstreichen.

Literatur:

- [1] J. Balzer, S. Werling und J. Beyerer. Regularization of the deflectometry problem using shading data. In *Proceedings of the SPIE Optics East*, 2006.
- [2] T. Bonfort. *Reconstruction de surfaces reflechissantes a partir d'images*. Dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [3] R. Kickingereder und K. Donner. Stereo vision on specular surfaces. In *Proceedings of IASTED Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing*, 335-339, 2004.
- [4] S. Roth und M. Black. Specular flow and the recovery of surface structure. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2:1869-1876, 2006.
- [5] S. Savarese, M. Chen und P. Perona. Local shape from mirror reflections. *International Journal of Computer Vision*, 64 (1):31-67, 2005.
- [6] J. A. Sethian. *Level Set Methods and Fast Marching Methods*. Cambridge University Press, 1999.
- [7] J. Solem, H. Anaes und A. Heyden. A variational analysis of shape from specularities using sparse data. *3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 332-343, 2004.

Design, Regelung und Bewertung von kinästhetischen haptischen Eingabegeräten

Dieser Vortrag befasst sich mit ausgewählten Entwurfs-, Regelungs- und Bewertungsaspekten von kinästhetischen haptischen Displays. Es wird das mechatronische Design einer Familie von haptischen Eingabegeräten beschrieben, welches durch Einsatzflexibilität und Erweiterbarkeit geprägt ist. Die Geräte unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Spezifikation des Arbeitsraums und der Kraftkapazität deutlich von der Mehrzahl anderer in der Literatur beschriebener Systeme. Alleinstellungsmerkmal ist die Verwendung von mehreren aktuierten redundanten Gelenken zur Vermeidung von singulären Konfigurationen.

Virtual-Reality- und Telepräsenzsysteme ermöglichen dem Menschen die interaktive Exploration und Manipulation von virtuellen und weit entfernten Umgebungen. Beispiele hierfür sind Robotikanwendungen in der Raumfahrt (Mars Pathfinder Mission), Telemanipulationssysteme in der minimalinvasiven Chirurgie (ZEUSTM, daVinciTM), virtuelle Chirurgesimulatoren zur Ausbildung und dem Training von Medizinstudenten und Ärzten (VEST SystemTM) und die intuitive und realitätsnahe Exploration von virtuellen Prototypen im Produktdesign (Digital Mock-Ups in der Automobilentwicklung). Bei der Mehrzahl dieser Systeme werden lediglich visuelle und auditive Displaytechniken verwendet, um entsprechende Informationen an den Bediener zu übermitteln. Im letzten Jahrzehnt ist ein vermehrter Einsatz von haptischen Mensch-System-Schnittstellen bei Virtual-Reality- und Telepräsenzsystemen zu beobachten. Die Darstellung von taktilen und kinästhetischen Sinneseindrücken erlaubt es dem Bediener, virtuelle und entfernte Objekte anzufassen und deren mechanische Eigenschaften (z.B. Gewicht und Steifigkeit) zu fühlen.

Ein zentrales Entwurfsziel von haptischen Displays ist die Darstellbarkeit von niedrigen mechanischen Impedanzen (z.B. zur Simulation von Freiraum), bei denen Störkräfte aufgrund der natürlichen Dynamik des Geräts möglichst gering sein sollen. Insbesondere gesteigerte Anforderungen an den Arbeitsraum stellen eine beträchtliche Herausforderung beim Design von haptischen Displays dar, da aus der Zunahme der Größe des Geräts üblicherweise eine deutliche Verschlechterung der dynamischen Eigenschaften resultiert. In diesem Vortrag wird als Lösungsvorschlag die Verwendung von aktuierten redundanten Gelenken diskutiert. Die zusätzlichen Gelenke erlauben die Vermeidung von inneren Singularitäten, wodurch eine signifikante Vergrößerung des Arbeitsraums bzw. Reduktion der Baugröße ermöglicht wird. Zudem können die redundanten Freiheitsgrade für die Bereitstellung eines unbegrenzten rotatorischen Arbeitsraums verwendet werden.

Neben mechanischen Designmaßnahmen hat das Regelkonzept des haptischen Eingabegeräts einen maßgeblichen Einfluss auf die Darstellbarkeit von niedrigen Impedanzen. Eine Analyse von Impedanz- und Admittanzregelkreisarchitekturen für haptische Displays hebt die Hauptunterschiede dieser beiden Ansätze hervor. Die Regelung des vorgestellten hyper-redundanten Geräts (siehe Abbildung 1) erfordert Lösungsalgorithmen für die inverse Kinematik. Die verwendete Methode basiert auf einer Entkopplung der rotatorischen von den translatorischen Freiheitsgraden. Dadurch kann die inverse Kinematik in zwei unabhängig voneinander lösbar Probleme unterteilt werden. Es wird ein Regelalgorithmus basierend auf der Pseudoinversen beschrieben, der sich sehr gut zur haptischen Mensch-Maschine-Interaktion eignet und einen unbegrenzten rotatorischen Arbeitsraum ermöglicht.

Die Diskussion von Bewertungsmethoden für haptische Displays legt den Fokus auf die Leistungsbewertung verschiedener Regelungsstrategien. Es wird hervorgehoben, dass eine syste-

matische und reproduzierbare Bewertung von Performanzkriterien, die durch aktive Regelung beeinflusst werden, ein offenes Forschungsproblem ist. Die Schwierigkeit begründet sich darin, dass die Lastcharakteristik des menschlichen Operators schwierig mit standardisierten Prüfständen zu replizieren ist. Experimente mit fest eingespanntem End-effektor sind nur bedingt aussagekräftig, da diese veränderte Lastcharakteristik in der Regel eine Reduktion der Reglerverstärkungen erfordert und die Ergebnisse beeinflusst. Hardwareexperimente zur vergleichenden Bewertung verschiedener Admittanzregler zeigen für alle drei der in diesem Vortrag vorgestellten haptischen Displays beste Ergebnisse bei Verwendung einer Beschleunigungsvorsteuerung in Kombination mit verhältnismäßig niedrigen Reglerverstärkungen. Dieses Ergebnis weicht von den üblichen in der Literatur gegebenen Empfehlungen ab, die den Bedarf hoher Verstärkungsfaktoren betonen, damit die Bandbreite des inneren Regelkreises die des äußeren übersteigt.

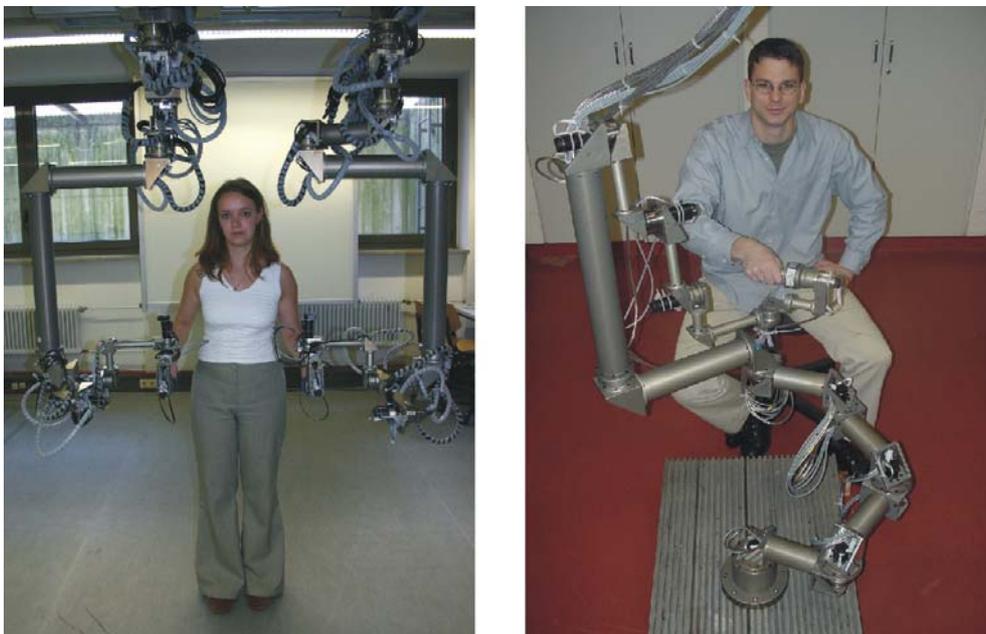


Abbildung 1: Hyper-redundante haptische Displays

Verteilte Verarbeitung

industrieller Prognose- und Ursachenanalysemodelle

Dipl.-Ing. Mario Thron

Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg (ifak)

Steinfeldstr. 3 (IGZ), D-39179 Barleben, GERMANY

TEL : +49 (0) 39203 810 64, MAIL : Mario.Thron@ifak.eu

Schlüsselwörter: Funktionsblocksystem, Web-Service, Verteilte Datenverarbeitung, Datenanalyse, Prognose, Vorhersage, Ursachenanalysemodell, Planung, Instandhaltung, Investitionsplanung

Einleitung

Der Erfolg eines Industrieunternehmens hängt von internen und externen Faktoren ab. Die Produktionsleitung entscheidet über Maßnahmen, um bei geringstmöglichem Ressourcenverbrauch die größtmögliche Produktionsgeschwindigkeit und die vom Kunden gewünschte Produktqualität zu erreichen. Dieser Entscheidungsprozess kann unterstützt werden, indem Daten über Energie- und Stoffströme sowie Stoffeigenschaften der Rohstoffe und Produkte ständig überwacht, automatisch ausgewertet und die Ergebnisse der Produktionsleitung zur Verfügung gestellt werden.

Prognosen bilden die Grundlage einer vorausschauenden Entscheidungsstrategie. Dabei werden zukünftige Zustände abgeschätzt und mit idealisierten Zuständen verglichen. Falls Differenzen auftreten wird über gegensteuernde Maßnahmen entschieden. Die Ursachenanalyse ist Basis einer anderen Entscheidungsstrategie. Dabei wird bei Abweichung des Momentanzustandes von einem idealisierten Zustand auf die wahrscheinlichsten Ursachen geschlossen und über Gegenmaßnahmen entschieden. Für die Bildung beider Modellarten müssen historische Messwertreihen verarbeitet werden. Viele Informationen, die zur Entscheidungsfindung genutzt werden können, sind in den Systemen zur Prozess- und Fertigungssteuerung als Momentanwerte verfügbar (z.B. Betriebs-, Prozess- und Qualitätsdaten). Aktuelle Steuerungssysteme besitzen häufig keine ausreichende Speicherkapazität und Rechenleistung, um die erforderlichen Algorithmen zur Modellbildung abzuarbeiten. Deshalb wird der Einsatz PC-basierter Technik notwendig.

Eine allgemeine Modellbildung aus einem Datenpool von Messwerten ist nicht oder nur für eine begrenzte Anzahl von Einflussgrößen praktikabel (z.B. mit Hilfe von Selbstorganisationsprinzipien in Neuronalen Netzen). Deshalb muss der Analyst eine Modellstruktur vermuten und kann mit speziellen Lernverfahren Modellparameter ermitteln, die anschließend verifiziert werden müssen. Die Vermutung einer Modellstruktur kann nur von Personen vorgenommen werden, die je nach Betrachtungsgegenstand ausreichend Wissen über technologische Prozessabläufe, Eigenschaften der Produkte oder Betriebsmittel besitzen. In vielen kleinen und mittelständischen Unternehmen existiert eine betriebsinterne Serviceabteilung, deren Mitarbeiter häufig die genannten Kenntnisse besitzen. Außerdem sind sie im Bedarfsfall in der Lage, erforderliche neue Messstellen einzurichten. Neben entsprechenden mathematischen Kenntnissen benötigen die betreffenden Personen eine entsprechende Softwareinfrastruktur für den Entwurf und die Anwendung der Modelle.

Funktionsblockmodell für die verteilte Datenverarbeitung

Der Vortrag berichtet über ein verteiltes Datenverarbeitungssystem, mit dem Personen aus den Serviceabteilungen Prognose- und Ursachenanalysemodelle modular entwerfen und später anwenden können. Als Metamodell findet darin das in der Automatisierungstechnik verbreitete Funktionsblockmodell Anwendung. Der konventionelle Umgang von Funktionsblöcken mit Daten und Ereignissen (siehe IEC61131 und IEC61499) wird auf den Umgang mit Messwertreihen erweitert.

Einige Algorithmen zur Modellbildung (Struktur- und Parameterlernen) sind äußerst umfangreich und verbrauchen große Mengen an Rechenzeit und Speicher. In vielen Fällen existieren für derartige Algorithmen Implementierungen in speziellen Programmiersprachen wie z.B. MATLAB/Simulink, SAS, Mathematica oder GNU/R. Die mit dem System berechneten Entscheidungsvorschläge müssen außerdem in Arbeitsabläufe integriert werden, die mit moderner Bürokommunikationssoftware bearbeitet werden. Deshalb berücksichtigt das Datenverarbeitungssystem verteilte Rechnersysteme mit einer heterogenen Softwarelandschaft.

Das Datenverarbeitungssystem bietet die Möglichkeit, Messwertreihen auf dem lokalen Laufzeitsystem zu verarbeiten. Die Effizienz verschiedener Algorithmen, die sich in unterschiedlichen Funktionsblöcken befinden, kann deutlich voneinander abweichen. Deshalb ermöglicht das Laufzeitsystem eine unterschiedliche Konfiguration der Messwertreiheneingänge der Funktionsblöcken, auch wenn sie sich auf die gleiche Messwertreihe der analogen bzw. digitalen Eingänge (in *Abb. 2* als AIN bzw. DIN gekennzeichnet) des Laufzeitsystems beziehen. Die Konfigurationsmerkmale umfassen z.B. die Approximation zeitäquidistanter Werte, unterschiedliche Zahl von

berücksichtigten Messwerten oder unterschiedliche Abstände der Messzeitpunkte. Somit können die Algorithmen in den Funktionsblöcken direkt aufgenommene aber auch vorverarbeitete Messwertreihen verwenden.

Funktionsblockalgorithmen können auf dem lokalen Laufzeitsystem oder auf entfernten Ressourcen verarbeitet werden. Im letztgenannten Fall kann es bei Verwendung eines einfachen Dienstauftrufmodells (Berechnung der Ergebnisse als Funktion von Parametern durch den entfernten Dienstanbieter) zu hoher Belastung der Netzwerkverbindungen kommen. Deshalb führt das Verarbeitungsmodell Proxyblöcke und entfernte Funktionsblöcke ein, die kontinuierlich ihre Daten miteinander synchronisieren (siehe *Abb. 1*). Die Verarbeitung der Messwertreihen kann somit asynchron durch Steuerereignisse ausgelöst werden.



Abb. 1: Modell des Datenverarbeitungssystems

Das Datenverarbeitungssystem ist nicht direkt mit einem Steuerungssystem vergleichbar. Dies wird insbesondere dadurch deutlich, dass keine direkt in den Prozessablauf rückführenden Steuerungsausgänge vorgesehen sind. An die Stelle der Ausgänge treten Reportbausteine (in *Abb. 2* als RPRT gekennzeichnet), die grafische Datendarstellungen bzw. tabellarische Berichte ausgeben können. Weiterhin können Nachrichten an verschiedene Softwaresysteme gesendet werden.

Weitere Unterschiede bestehen in den Anforderungen an Reaktionszeiten und die Art der Verarbeitung. Auf dem vorgestellten System erfolgt die Datenverarbeitung zweistufig:

- a) zur Modellbildung und -anpassung (zyklisch oder manuell gesteuert) stündlich bis jährlich und
- b) zur Prognose (meist zyklisch) oder Ursachenanalyse (bei Bedarf) bei Abständen im Stundenbereich.

Damit unterscheidet sich das Datenverarbeitungssystem von Steuerungen der Automatisierungstechnik, die meist zyklisch, unter Echtzeitbedingungen und bei Reaktionszeiten im Millisekundenbereich arbeiten.

Bindung an Kommunikationssysteme

Das Datenverarbeitungsmodell ist betriebs- programmiersprachen- und betriebssystemunabhängig. Wesentliche Modellelemente sind das Laufzeitsystem und paarig auftretenden Proxy- und entfernten Funktionsbausteine mit ihren auf die Verarbeitung von Messwertreihen optimierten Eigenschaften. Die Referenzimplementierung (Beispielskizze siehe *Abb. 2*) sieht die Verwendung von Web-Services zur Kommunikation zwischen lokalem Laufzeitsystem und entfernten Ressourcen vor. Dies wird mit der damit erreichbaren hohen Interoperabilität und Flexibilität (firewallfreundlich, späte Bindung an unterlagerte Kommunikationsprotokolle) und mit der Unterstützung durch Anbieter von Softwareentwicklungssystemen, Betriebssystemen, Bürokommunikations- und Planungssoftware begründet. Die Abbildung des Modells auf Web-Services ist jedoch keine feste Bindung.



Abb. 2: Skizze der Referenzimplementierung

Random Finite Set Theorie zur Multiobjektverfolgung mit unsicheren und mehrdeutigen Messdaten

Mirko Mählisch

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm
Albert-Einstein-Allee 41, 89069 Ulm
Tel. +49 731 50 26328
Fax. +49 731 50 26301
mirko.maehlich@uni-ulm.de

Klaus C.J. Dietmayer

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm
Albert-Einstein-Allee 41, 89069 Ulm
Tel. +49 731 50 26302
Fax. +49 731 50 26301
klaus.dietmayer@uni-ulm.de

Schlüsselwörter: Finite Set Statistics (FISST), Joint-Multitarget Filtering, Daten-Assoziation, Klassifikation, Fahrerassistenzsysteme

Das Problem der Detektion und Verfolgung einer unbekanntem, zeitlich veränderlichen Anzahl von Objekten aus unvollständigen und mit Messfehlern behafteten Sensordaten stellt sich mit der heute verfügbaren Sensortechnologie wie Radar, Sonar, Lidar oder Video in vielen Anwendungsfeldern. Die Messdaten weisen im Allgemeinen Mehrdeutigkeiten hinsichtlich der Existenz eines Objektes, des Objekttyps und der Zuordnung von Messungen zu Objekten auf. Hinzu kommen die Unsicherheiten der Messgrößen selbst. Der klassische Lösungsansatz bei derartigen Fragestellungen ist die sequentielle Abarbeitung von folgenden Schritten: Detektion bzw. Segmentierung, Datenassoziation, Filterung und Validierung (Klassifikation). Die Vorteile dieses mehrstufigen Verfahrens liegen in der Spezialisierung der Komponenten, die sich dann getrennt Parametrisieren und Optimieren lassen. Aufgrund der Informationsverdichtung an den Komponentenschnittstellen, der Objektliste und Trackliste ist die rechnergestützte Abarbeitung sehr schnell. Von Nachteil ist der mit der Informationsverdichtung einhergehende Informationsverlust, der auf die Inkompatibilität der mathematischen Modelle in den einzelnen Komponenten zurückzuführen ist. So liegen anhand der aus den Messdaten extrahierten Merkmale im Detektionsschritt eigentlich Klassenzugehörigkeitsevidenzen vor, beispielsweise in Form von diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen hinsichtlich der Zugehörigkeit des erfassten Objekts zu einer Objektklasse (Objekthypothesen). Da das Tracking aber aufgrund des internen mathematischen Modells einer Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichtefunktion im Zustandsraum die tatsächliche Existenz einer Hypothese voraussetzt, bzw. keine Unsicherheiten auf der Klassenzugehörigkeit modelliert, muss die Repräsentation durch eine Schwellwertbildung auf den Klassenzugehörigkeitsevidenzen angepasst werden, wodurch eventuell vorhandene differenzierte Klassifikationsmerkmale verworfen werden. Nach dem Tracking stehen dann nur noch die dynamischen Merkmale zur Validierung zur Verfügung, die aber speziell im Fall stark räumlich autokorrelierter Falschdetektionen wenig Aussagekraft besitzen.

In sicherheitskritischen Anwendungen ist es zum Ausschluss von Fehlreaktionen jedoch wünschenswert, jede in den Daten enthaltene Information auszunutzen. Erst kürzlich wurde von Ronald Mahler die Theorie der Random-Finite-Set-Statistics (FISST) formuliert, die das Detektionsproblem, das Zuordnungsproblem und die Filterung in eine vereinheitlichte Schätztheorie aufnimmt (Joint-Multi-Target-Tracking). Dabei wird nicht jedes Objekt der beobachteten Szene separat gefiltert, sondern die gesamte beobachtete Szene durch eine endliche Menge von Objekten mit Klassenzugehörigkeit und dynamischen Zuständen modelliert. Das unsichere Wissen über die beobachtete Szene wird durch ein

Wahrscheinlichkeitsmaß $p(\Gamma)$ auf zufälligen, zeitveränderlichen endlichen Mengen von Objekten, $\Gamma = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ (Random Finite Sets), definiert. Das erste statistische Moment dieser Wahrscheinlichkeitsdichte ist

$$D(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \int p(\{x, y_1, \dots, y_n\}) dy_1 \dots dy_n \quad (1)$$

die Probability-Hypothesis-Density-Funktion (PHD), die nicht mehr auf der Mengendarstellung, sondern wieder im Zustandsraum eines Objektes definiert ist. Analog zur Filterrekursion nach Bayes lässt sich die PHD-Funktion, die gleichzeitig das unsichere Wissen über Anzahl und Zustand mehrerer Objekte repräsentiert, durch die Zeit propagieren (2) und mit Messungen spezifizieren (3):

$$D_{k|k-1}(x_k | Z_{k-1}) = B_{k|k-1}(x_k) + \int p_{death}(x_k) f_{k|k-1}(x_k | x_{k-1}) D_{k-1|k-1}(x_{k-1} | Z_{k-1}) \quad (2)$$

$$D_{k|k}(x_k | Z_k) = (1 - p_s) D_{k|k-1}(x_k | Z_{k-1}) + \sum_{z \in Z_k} \frac{p_s f(z | x_k) D_{k|k-1}(x_k | Z_{k-1})}{\lambda c_k(z) + p_s \int f(z | y) D_{k|k-1}(y | Z_{k-1}) dy} \quad (3)$$

Dabei beschreiben $B(x)$ das Erscheinen neuer Objekte an der Stelle x , $p_{death}(x)$ die Wahrscheinlichkeit des Verschwindens, $f(x_k | x_{k-1})$ das Zustandsübergangsmodell, p_s die Detektorpräzision, $f(z | x_k)$ das Messmodell und λ die Falschalarmrate. Für die Implementierung der PHD-Filtergleichungen (2, 3) wurden auf Gaussian-Mixtures basierende geschlossene Lösungen und Monte-Carlo Approximationen (Partikelfilter) vorgeschlagen. Die Extraktion von Objekten aus der multimodalen PHD-Funktion erfolgt durch die Erkennung signifikanter Peaks, z.B. mit dem EM-Algorithmus. Im Gegensatz zum sequentiellen Standardkonzept mit expliziter Datenassoziation verändern Fehlentscheidungen bei der Zielextraktion die PHD-Funktion nicht und wirken sich daher nicht negativ auf die folgenden Rekursionsschritte aus. Zusätzlich erzeugt das Filter eine zeitlich geglättete Detektionsentscheidung durch Einbeziehung der Detektor-Performance.

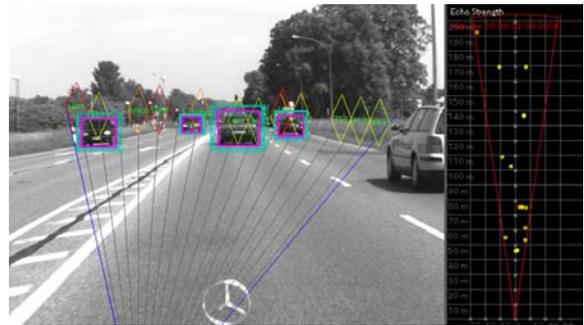


Bild 1: Fahrzeugumfelderfassung

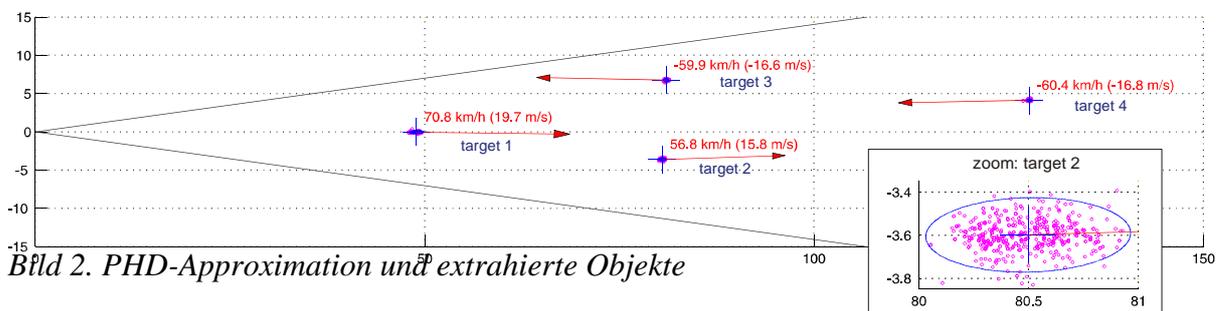


Bild 2. PHD-Approximation und extrahierte Objekte

Literatur:

- [1] R.Mahler: Random Sets: Unification and Computation for Information Fusion – A Retrospective Assessment. In: Proceedings of the 8th Intl. Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, 2004
- [2] O.Erdinc, P.Willett, and Y.Bar-Shalom. Probability hypothesis density filter for multitarget multisensor tracking. In Proceedings of International Conference on Information Fusion, Philadelphia, USA, 2005
- [3] M.Mählich, R.Schweiger, W.Ritter, K.Dietmayer: Multisensor Vehicle Tracking with the Probability Hypothesis Density Filter Proc. of ISIF/IEEE 9th Int. Conference on Information Fusion, Florence, Italy, 2006

Optimierende Regelung von SMB Prozessen

Achim Küpper*

Sebastian Engell **

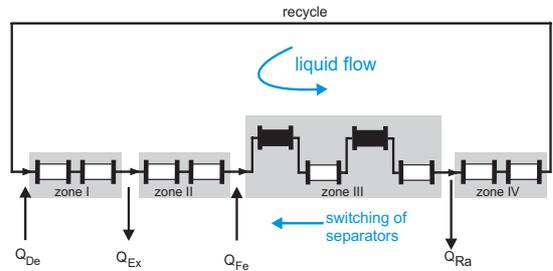
* Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik
Universität Dortmund
Emil-Figge-Str. 70, 44227 Dortmund
0231/7555128 (tel.)
0231/7555129 (fax)
achim.kuopper@bci.uni-dortmund.de

** Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik
Universität Dortmund
Emil-Figge-Str. 70, 44227 Dortmund
0231/7555126. (tel.)
0231/7555129 (fax)
s.engell@bci.uni-dortmund.de

Schlüsselwörter: Optimierende Regelung, Simulated Moving Bed, Hashimoto SMB

Optimierende Regelung, Simulated Moving Bed Chromatographie

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der optimierungsbasierten Regelung von chromatographischen Simulated Moving Bed Prozessen. Chromatographische Trennungen separieren Gemische von Stoffen aufgrund unterschiedlich starker Adsorption der Komponenten an einer festen Phase, was zu einer unterschiedlichen Laufzeit der Fraktionen durch die Trennsäulen führt. Der Simulated Moving Bed (SMB) Prozess besteht aus einer Anzahl von chromatographischen Trennsäulen, die zu einem geschlossenen Kreis verschaltet werden. Durch periodisches Weiterschalten der Zu- und Abläufe wird ein effektiver Gegenstrom von Flüssigphase und Feststoffpartikeln realisiert, was zu einer besseren Ausnutzung der Säulen gegenüber dem klassischen Batch-Prozess führt. Der Hashimoto SMB Prozess enthält zusätzlich Reaktoren, die zwischen die Trennsäulen geschaltet werden, um das chemische Gleichgewicht auf die Seite des gewünschten Produkts zu verschieben. Das verwendete Prozessmodell ist hybrid, berücksichtigt also sowohl die kontinuierlichen Trennvorgänge in den einzelnen Säulen als auch die diskreten Schaltungen. Die Trennsäulen werden durch partielle nichtlineare Differentialgleichungen beschrieben (General Rate Model), die mit einem effizienten Diskretisierungsschema in ein großes System gewöhnlicher Differentialgleichungen mit ca. 1.400 Zuständen umgewandelt werden. Ein Zyklus des Prozesses besteht aus N Umschaltungen, wobei N die Zahl der Trennsäulen ist. Nach einem Zyklus haben die Zu- und Abläufe wieder die ursprüngliche Position erreicht.



Unter einer direkt optimierenden Regelung verstehen wir eine Optimierung der Eingangsgrößen des Prozesses in einem endlichen Prädiktionshorizont hinsichtlich einer wirtschaftlichen Kostenfunktion, wobei die übrigen Randbedingungen wie z. B. Produktreinheiten als Nebenbedingungen der Optimierung und nicht in Form von Sollwerten implementiert werden [1, 2]. Grundlage der Optimierung ist das rigorose nichtlineare Prozessmodell. Ein ähnlicher Ansatz wird in [3, 4] verfolgt.

Im vorliegenden Anwendungsfall des Hashimoto Prozesses werden ein Prädiktionshorizont von fünf Zyklen und ein Stellhorizont von einem Zyklus benutzt. Um das Regelungsverhalten zu glätten, werden die Änderungen der Stellgrößen im Gütefunktional berücksichtigt. Zur Optimierung wurde der SQP-Löser FFSQP, der im zulässigen Lösungsraum optimiert, eingesetzt. Die Auswertung der Zielfunktion geschieht durch Simulation des rigorosen Prozessmodells über den Prädiktionshorizont (sequentielles Verfahren). Die Taktzeit ist ein freier Parameter der Optimierung. Als Gütefunktional wird der Lösungsmittelverbrauch minimiert, die

geforderten Produktreinheiten und eine Mindestausbeute werden als Nebenbedingungen formuliert. Als Stoffsystem wurde die Racemerisierung von Träger Base einem pharmazeutischen Wirkstoff betrachtet [5, 6]. Es werden Simulationen und experimentelle Ergebnisse vorgestellt.

Literatur:

- [1] S. Engell: Feedback Control for Optimal Process Operation. Plenary Paper, IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (ADCHEM) 2006, Gramado, Preprints 13-26, to appear in Journal of Process Control.
- [2] A. Toumi, and S. Engell: Optimization-based control of a reactive simulated moving bed process for glucose isomerization. *Chemical Engineering Science*, **59**, 2004, 3777-3792.
- [3] G. Erdem, S. Abel, M. Morari, M. Mazzotti, M. Morbidelli: Automatic Control of simulated moving beds II: Nonlinear Isotherms. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 3895-3907, 2004.
- [4] G. Erdem, M. Amanullah, M. Morari, M. Mazzotti, M. Morbidelli: Optimizing Control of an Simulated Moving Bed Unit. *AIChE Journal*, 52(4), 1481-1494, 2006.
- [5] A. Küpper, S. Engell: Non-Linear Model Predictive Control of the Hashimoto Simulated Moving Bed Process. In: *International Workshop on Assessment and Future Directions of Nonlinear Model Predictive Control* (L. Biegler, R. Findeisen, F. Allgöwer), Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- [6] A. Küpper, S. Engell: Optimizing Control of the Hashimoto SMB Process: Experimental Application. Submitted to: *IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems*, 2007.

A Global Planner for the Manipulator Motion Planning by using Cartesian Space

Darko Ojdanić *

* Institut für Automatisierungstechnik
Universität Bremen
Otto-Hahn-Allee 1, NW1, 28359 Bremen
Tel. +49-421-218-23-56
Fax: +49-421-218-45-96
Email: ojdanic@iat.uni-bremen.de

Axel Gräser **

** Institut für Automatisierungstechnik
Universität Bremen
Otto-Hahn-Allee 1, NW1, 28359 Bremen
Tel. +49-421-218-73-26
Fax: +49-421-218-45-96
Email: ag@iat.uni-bremen.de

Keywords: Motion planning, redundant manipulators, service robotics

Service robotics sets the most challenging tasks for the manipulator motion planning. The environment is often crowded with the obstacles, leaving only the narrow passages free, while the trajectories have to be calculated in the real time. An example of such a system is the rehabilitation robot FRIEND II [1] (see Fig. 1). It consists of the 7-DOFs lightweight manipulator mounted on the wheelchair, stereo camera system and a tactile skin. Therefore, a motion planning algorithm is needed, which is capable to deal with the cluttered environments and dexterous manipulators, but in the same time is fast enough for the practical implementation.

This work introduces a novel approach for the motion planning for the manipulators with many degrees of freedom (DOFs). In order to avoid the computation complexity, typical for multidimensional joint space [2], the planning is done by using the Cartesian space. Several planning methods in the Cartesian space were already proposed [3, 4], but those approaches have the characteristics of the local planner. Basically, that means they operate fast, but can easily be blocked in the parts of the workspace that form a dead-end (or local minima).

The idea is to create a global planner, which can work in combination with the local planner, but again within Cartesian space. Similar approach is used for the AMROSE planner [5], where in the first phase cell decomposition method is used and in the second the potential fields. But in that planner, only the TCP-path (Tool Centre Point) was planned in the first phase, without to guarantee that the manipulator is actually able to follow that path.

In the approach proposed here, the graph based search is applied in the Cartesian space workspace grid, but with the checking of the manipulators ability to move without collision in each step. This approach is capable to escape the workspace dead-ends. The obtained result is not only the TCP-path, but also the whole collision free joint trajectory. Although the initial idea was the combination with the local planners, this method can be used independently, in which case additional trajectory smoothing is necessary.



Figure 1: Rehabilitation robotic system FRIEND II

Furthermore, the proposed method is inherently suitable for the parallel processing. This is an important aspect, having in mind the emerging market of the multicore processors and the multiprocessor mainboards. Additional advantage of this planner is the ability to exclude distant obstacles from the distance calculation. Knowing that the calculation of the distances to the obstacles takes a large amount of the processing time, it is clear why neglecting the distant obstacles results in the considerable reduction of the calculation time.

Computing time of the inverse kinematics solution strongly influence the overall calculation time. Nevertheless, there are fast inverse kinematics solutions available even for redundant manipulators [6, 7]. Many of the known inverse kinematics solutions work very fast if the given location is in the vicinity of the current manipulator posture. Exactly this is the case in the approach presented here.

The test examples used in this work correspond to the model of the FRIEND II system. Although the test scenarios mach to the service robotics, they are also related to the ordinary industrial applications. Both approaches, using the algorithm directly or combining it with the local planner, are implemented and tested. Obtained results have shown that this algorithm can be successfully used in the practical applications.

Literature:

- [1] O. Prenzel, J. Feuser, I. Volosyak, O. Ivlev, and A. Gräser: "Task execution with the rehabilitation robotic system FRIEND II in intelligent home environment," International Journal of Assistive Robotics and Mechatronics, IJARM, Vol 7, No 2, June 2006.
- [2] M. LaVall, Planning algorithms, Cambridge University Press, 2006.
- [3] D. Ojdanic, O. Ivlev, and A. Gräser, "A new Fast Motion Planning Approach for Dexterous Manipulators in 3D-Cartesian Space," in Proc. ISR-Robotik Joint Conference on Robotics, Munich, Germany, 2006.
- [4] J. Kim and P. Khosla, "Real-time obstacle avoidance using harmonic potential functions," In IEEE Transactions on Robotics and Automation, 8(3):338–387, 1992.
- [5] L. Overgaard, R. Larsen, N. Jacobsen, "Industrial applications of the AMROSE motion planner," Practical Motion Planning in Robotics: Current Approaches and Future Directions, John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [6] O. Ivlev and A. Gräser, "The optimized kinematic configuration control algorithm for redundant robots," in Proc. 16th IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, Lausanne, Switzerland, 2000.
- [7] M. A. C. Gill and A. Y. Zomaya, "Obstacle avoidance in multi-robot systems: experiments in parallel genetic algorithms," World Scientific Series in Robotics and Intelligent Systems, vol. 20, pp 72-75, 1998.

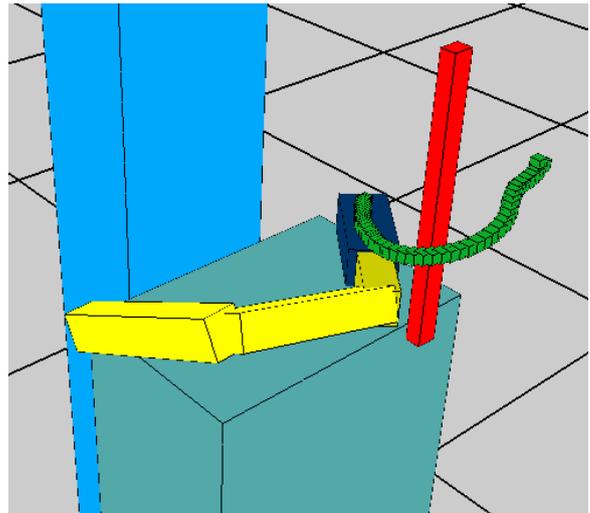


Figure 2: Planned path in case of the task typically problematic for the local planners

Synthese verteilter Sicherheitssteuerungen

Dirk Missal*

Hans-Michael Hanisch*

* Lehrstuhl Automatisierungstechnik
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Kurt-Mothes-Straße 1, 06120 Halle
Tel. 0345-5525971
Fax 0345-5527304

dirk.missal@informatik.uni-halle.de

hans-michael.hanisch@informatik.uni-halle.de

Schlüsselwörter: verteilte Steuerung, formale Synthese, verbotene Zustände, Funktionsblöcke nach IEC61499

Der steigende Bedarf an Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit in der Produktion führt zu verteilten interagierenden Teilsteuerungen für Fertigungssysteme. Diese können mit den Produktionsanlagen leicht ausgetauscht und neu angeordnet werden, um neuen Anforderungen gerecht zu werden. Mit der Entwicklung neuer Hardware und der Verbreitung des IEC61499 Standards gewinnt die Entwicklung von Ansätzen zur Analyse, Verifikation und Synthese für verteilte Steuerungen an Bedeutung. Die Erkenntnisse zu zentralen Steuerungen können dabei auf verteilte Systeme übertragen und durch neue Methoden ergänzt werden.

Der Vortrag präsentiert zwei Ansätze zur Synthese von Steuerungen zur passiven Verhinderung verbotener Zustände.

Die ungesteuerten Strecken werden mittels sicherer Netz- Condition/Event- Systeme (sNCES) modelliert. Damit können die Unterteilungen der Strecke in Teilstrecken sowie deren Kopplungen günstig im Modell abgebildet werden, was für die Synthese von großer Bedeutung ist. Unter Verwendung von Prädikaten werden über dem Modell Mengen verbotener Zustände definiert.

Mittels Conditionsignalen als Eingangssignale in das Streckenmodell kann das Schalten von Transitionen bzw. Schritten im Modell ermöglicht oder verhindert werden. Solche Transitionen bzw. Schritte sind steuerbar. Beide vorgestellten Ansätze basieren auf der Annahme, dass sowohl Steuerung als auch Kommunikation viel schneller ablaufen als sich der Zustand der Strecke ändert.

Ergebnis der Synthese ist in beiden Fällen eine Steuerungsstruktur und – Funktionalität, wie sie schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist. Entscheidungsfunktionen in den lokalen Steuerungen ermöglichen oder verhindern das Schalten entsprechender steuerbarer Transitionen bzw. Schritte in den den Teilstrecken zugeordneten Teilmodellen. Dazu erhal-

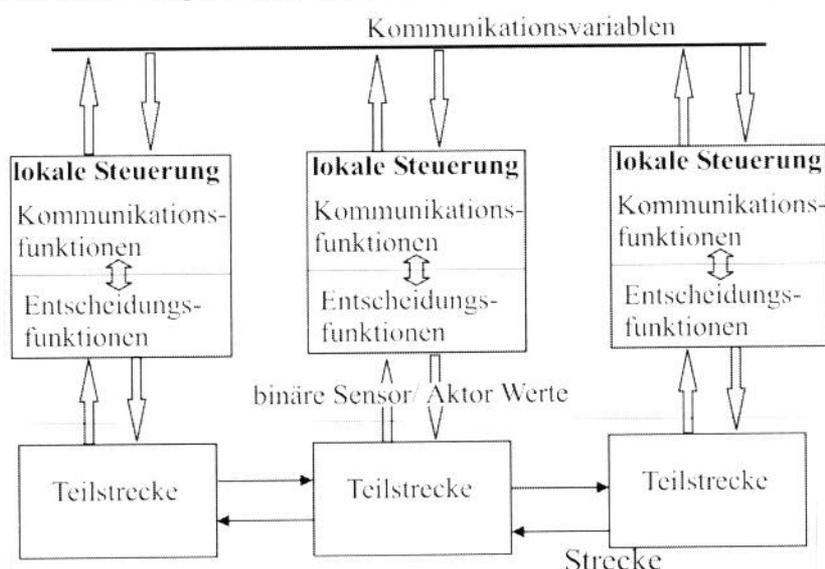


Abbildung 1: Struktur des geschlossenen Kreises des verteilten Systems

ten die Entscheidungsfunktionen Informationen über Teilzustände des zugeordneten Teilstreckenmodells sowie Informationen über relevante Teilzustände anderer Teilstreckenmodelle, die mittels Kommunikationsvariablen zwischen den Teilsteuerungen ausgetauscht werden. Hierzu sind für jede Teilsteuerung zusätzlich zu den Entscheidungsfunktionen Kommunikationsfunktionen zu realisieren, die diese Kommunikationsvariablen berechnen. Beide Funktionen werden mittels Synthese generiert und in Funktionsblöcke nach IEC61499 überführt.

Jeder Synthesealgorithmus, der auf reale Systeme anwendbar sein soll, muss die Berechnung des vollständigen Zustandsraumes umgehen. Deshalb wird für beide vorgestellten Ansätze eine Rückwärtssuche angewendet. Dabei werden rückwärts alle Schritte und Schrittsequenzen (Rückwärtstrajektorien) bestimmt, die in einen verbotenen Zustand führen können. Die Rückwärtssuche wird Schritt für Schritt fortgesetzt, bis ein steuerbarer Schritt für jede Trajektorie gefunden wurde. Auf diese Weise wird die nichtsteuerbare Vorregion für jeden verbotenen Zustand berechnet. Ein Algorithmus zur Rückwärtssuche ist in [1] ausführlich beschrieben.

Der erste Ansatz stellt die Modifikation eines Algorithmus zur Berechnung zentraler Steuerungen dar. Er ist in [2] vorgestellt worden. Das modulare sNCES-Modell wird komplett komponiert und der Algorithmus zur Synthese zentraler Steuerungen angewendet. Die Information über die Zugehörigkeit von Modellelementen zu Teilstreckenmodellen, die bei der Komposition verloren geht, wird zuvor zusätzlich gespeichert. Die berechneten zentralen Steuerungsfunktionen werden mit Hilfe dieser zusätzlichen Information anschließend in lokale Entscheidungsfunktionen und Kommunikationsfunktionen transformiert.

Im zweiten Ansatz erfolgt die Komposition nur innerhalb der Teilstreckenmodelle, die als eigenständige Module erhalten bleiben und mit den anderen Modulen über Signale gekoppelt sind. Bei dieser Vorgehensweise werden Rückwärtsschritte und Zustandsprädikate nur innerhalb von Teilstreckenmodulen berechnet. Dabei sind die Signalverbindungen zwischen den Teilstrecken zu berücksichtigen. Im Ergebnis erhält man direkt lokale Entscheidungsfunktionen und die Kommunikationsfunktionen, welche sich aus den Abhängigkeiten der Teilstrecken untereinander ergeben. Es ergibt sich ebenfalls eine Steuerungsstruktur, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist.

Im Vortrag werden an einem Beispiel die beiden Vorgehensweisen gezeigt und miteinander verglichen.

Bislang wurden die Methoden an Beispielen entwickelt. Weitergehende wissenschaftliche Analysen hinsichtlich minimaler Einschränkung des Streckenverhaltens, des Umfangs der notwendigen Kommunikation der Teilsteuerungen untereinander sowie der Komplexität werden gegenwärtig und zukünftig ausgeführt.

Das Forschungsvorhaben wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert (HA 1886/16-1).

Literatur:

- [1] A. Lüder. Formaler Steuerungsentwurf mit modularen diskreten Verhaltensmodellen, Hallenser Schriften zur Automatisierungstechnik Band 2, Logos-Verl., 2000.
- [2] D.Missal, H.-M.Hanisch. Synthesis of Distributed Controllers by Means of a Monolithic Approach, 11th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'2006), Prag, Tschechische Republik, 20-22. September 2006.

Zur Dynamik und Regelung eines PEM-Brennstoffzellensystems

Michael A. Danzer *

Eberhard P. Hofer **

* Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm
Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm
Tel.: 0731 50 26325
Fax: 0731 50 26301
michael.danzer@uni-ulm.de

** Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm
Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm
Tel.: 0731 50 26300
Fax: 0731 50 26301
ep.hofer@uni-ulm.de

Schlüsselwörter: PEM-Brennstoffzelle, nichtlinearer Folgebeobachter, flachheitsbasierte Regelung, robuste Lastregelung

Wesentlich für einen dynamischen Betrieb eines Polymerelektrolytmembran-PEM-Brennstoffzellensystems ist eine effektive Regelung des Kathodendrucks und der Massenflussbereitstellung von Sauerstoff bzw. Luft. Dabei muss vor allem gewährleistet werden, dass im Kathodenvolumen der Brennstoffzelle keine Sauerstoffunterversorgung auftritt, die irreversible Reaktionen und damit eine Schädigung der Brennstoffzelle zur Folge hätte.

Das dynamische Modell der kathodenseitigen Gasversorgung (s. Abbildung 1) umfasst die Brennstoffzelle und die sie umgebenden Komponenten wie Leitungen, das Auslassventil und den Massenflussregler (MFC). Grundlage der Modellierung bilden Massenbilanzgleichungen der Leitungen und Gaskanäle. Die Modellparameter werden experimentell mittels des Optimierungsverfahrens nach Nelder und Mead identifiziert [6].

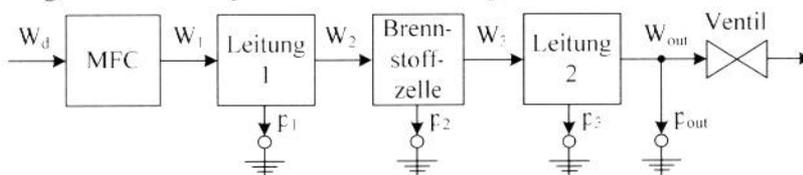


Abbildung 1: Struktur des pneumatischen Subsystems

Ziel der Regelung des pneumatischen Subsystems ist es, eine dynamische Lastanforderung zu ermöglichen, ohne die Brennstoffzelle gefährdenden Betriebszuständen auszusetzen. Dazu müssen der Massenstrom des Kathodengases W_1 bzw. der Sauerstoffumsatz u_{O_2} und der Kathodendruck p_2 geregelt werden. Zur Vermeidung einer Sauerstoffunterversorgung wird als Nebenbedingung gefordert, dass der Sauerstoffpartialdruck an der Kathode zu keiner Zeit einen definierten Grenzwert unterschreitet.

Für die Druck- und Umsatzregelung wurde ausgehend von der nichtlinearen Modellbeschreibung eine flachheitsbasierte Regelung entsprechend Abbildung 2 entworfen [2], [5]. Als Spezialfall einer Solltrajektorie werden konstanter Druck und konstanter Umsatz gefordert.

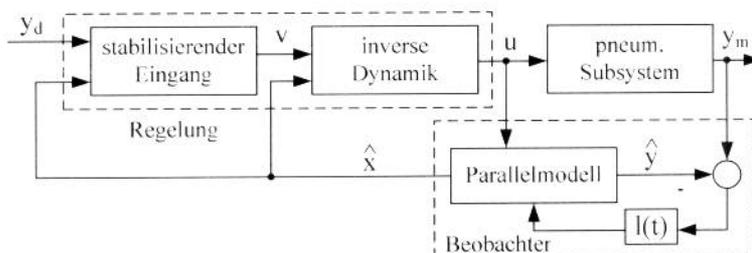


Abbildung 2: Struktur der flachheitsbasierten Regelung und des nichtlinearen Folgebeobachters

Da in der Brennstoffzelle kein Drucksensor integriert ist, wird zudem ein nichtlinearer Folgebeobachter für die Schätzung des aktuellen Kathodendrucks implementiert [1].

Bei sehr steilen Lastflanken und sprunghaften Lastwechseln kann trotz aufwändiger Druck- und Umsatzregelung aufgrund der Trägheit der Aktoren und Zuleitungen der Fall auftreten,

dass zeitweise mehr Sauerstoff in der Reaktion umgesetzt als in diesem Zeitraum der Kathode zugeführt wird. Um nichtreversible Reaktionsprozesse bei der Unterversorgung mit Sauerstoff zu verhindern, muss der Laststrom für diesen Fall durch eine überlagerte Lastregelung be-

grenzt werden. Der von der Last angeforderte Strom dient dabei, wie in Abbildung 3 dargestellt, als Eingangsgröße eines Parallelmodells. Daraus wird der

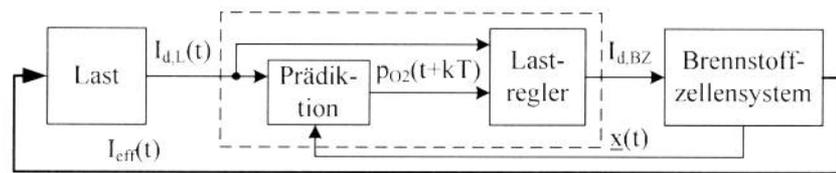


Abbildung 3: Prinzip des Lastreglers

Verlauf des Sauerstoffpartialdrucks prädiziert. Sollte der Partialdruck zu einem Zeitpunkt $t+kT$ innerhalb des Prädiktionsintervalls $[t; t+T_H]$ unter eine definierte Schranke sinken, wird die effektive Lastanforderung an das Brennstoffzellensystem reduziert [4]. Für eine robuste Lastregelung werden Parameterunsicherheiten konservativ abgeschätzt und bei der Prädiktion in Form von Sensitivitätsfunktionen berücksichtigt [3].

Literatur:

- [1] M.A. Danzer, H. Aschemann und E.P. Hofer, *Nonlinear Model-Based Pressure Observation and Pressure Control for a PEM Fuel Cell System*, in Proc. of 12th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, Poland, 2006
- [2] M.A. Danzer, J. Wilhelm, H. Aschemann und E.P. Hofer, *Model-Based Control of Cathode Pressure and Oxygen Excess Ratio of a PEM Fuel Cell System*, in Proc. of 10th Ulm Electro Chemical Talks, 2006
- [3] Khalil, H.K., *Nonlinear Systems*, Pearson Education, 2000
- [4] J. Sun und I. Kolmanovsky, *Load Governor for Fuel Cell Oxygen Starvation Protection: A Robust Nonlinear Reference Governor Approach*, in Proc. of the 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts, pp. 828-833, 2004
- [5] R. Rothfuß, J. Rudolph und M. Zeitz, *Ein neuer Zugang zur Steuerung und Regelung nichtlinearer Systeme*, Automatisierungstechnik 45, 517-525, 1997
- [6] J. Wilhelm, *Modellierung, Identifikation und Regelung der kathodenseitigen Gaszufuhr einer PEM-Brennstoffzelle*, Diplomarbeit, Universität Ulm, 2005

Leistungsanalyse von Systementwürfen mittels UML und Generalisierten Netzen

Evelina Koycheva

Institut für Automatisierungstechnik (Prof. Janschek)
Technische Universität Dresden, 01062 Dresden
Tel. +49 (351) 46332237
Fax +49 (351) 46337039
evelina.koycheva@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Systementwurf, Leistungsanalyse, UML, Petri-Netze

Entscheidende Produkteigenschaften von Informations- und Automatisierungssystemen sind neben der geforderten Funktionalität auch gesicherte Leistungseigenschaften wie Antwortzeiten, Durchsatz und Auslastung. Das Erkennen von Leistungsdefiziten in den früheren Entwurfsphasen, noch vor der Implementierung und der Anschaffung der notwendigen Hardware, ist bekanntermaßen von großer Wichtigkeit zur Begrenzung der Entwicklungskosten.

Für die Modellierung von automatisierungstechnischen Systemen existieren unterschiedliche Ansätze, Modelle und Methoden. Beispielhaft seien hier die Warteschlangenmodelle, die objektorientierten Methoden (in der Regel UML-Modelle), die netzbasierten Modelle (Petri-Netze und deren Erweiterungen) und die Graphen-Modelle [1] genannt.

In den letzten Jahren hat besonders *UML (Unified Modeling Language, [2])* eine große Verbreitung als Sprache und Notation zur Spezifikation, Konstruktion, Visualisierung und Dokumentation von Modellen für objektorientierte Softwaresysteme gefunden. Ihre Etablierung als Quasi-Standard für Softwareentwurf verdankt UML unter anderem der breiten Palette ihrer Modellierungsmöglichkeiten, der Durchgängigkeit des Ansatzes, der sehr guten Werkzeugunterstützung sowie der intuitiven Klarheit der grafischen Modelle für (auch unerfahrene) Spezialisten aus unterschiedlichen Fachbereichen. Mit der Verabschiedung des *Profile for Schedulability, Performance and Time (SPT-Profile, [3])*, einer UML-Erweiterung, im Januar 2005 wurde auch die Gelegenheit geschaffen, leistungsrelevante Systemeigenschaften oder Anforderungen in den UML-Entwurf einzubeziehen. Ein offenes Problem bleibt aber die fehlende Möglichkeit einer anschließenden Simulation oder Leistungsanalyse des annotierten Entwurfes. Somit ist eine Überführung der bereits existierenden Entwürfe in eine andere Modellrepräsentation erforderlich, die eine Verifikation des Modells gestattet.

Eine qualitative Vergleichsanalyse (vgl. [4]) von Beschreibungsmitteln für Automatisierungslösungen bezüglich verschiedener Merkmale, wie z.B. Dynamik, Simulierbarkeit und Analysierbarkeit zeigt, dass lediglich Petri-Netze [5] eine gute Unterstützung für alle diese Merkmale aufweist. Aus diesem Grund scheint die Transformation von UML-Modellen in Petri-Netze zur System- und Leistungsanalyse besonders nahe liegend. Die Anwendung der klassischen Petri-Netze zeigt aber einige Nachteile und Schwächen wie schnell wachsende Größe und damit verbundene Unübersichtlichkeit des Modells oder willkürliche Lösung von Konflikten im Netzmodell. Um diese Nachteile zu überwinden, basiert der hier vorgestellte Ansatz auf einer speziellen Art von Petri-Netzen – den so genannten *Generalisierten Netzen (Generalized Nets, GN, [6])*. Dabei handelt es sich um eine Verallgemeinerung modifizierter zeitbewerteter Petri-Netz-Ansätze. Zu den wichtigsten Unterschieden zwischen den Generalisierten Netzen und anderen Klassen von Petri-Netzen zählt z.B. die zu jeder Transition gehörende Indexmatrix, deren Elemente Prädikate darstellen und die nach ihrer Auswertung die Richtung des

Markenflusses von den Eingangsplätzen zu den Ausgangsplätzen bestimmen. Als weitere Eigenschaft bilden die Marken eines GN unterscheidbare Instanzen, die in das Netz mit bestimmten Charakteristika eintreten und die während ihrer Bewegung im Netz weitere Charakteristika hinzu bekommen, also eine Historie sammeln. Ferner kann die Zeitdauer des Markenflusses in einem GN in einer beliebig ausgewählten Zeitskala abgerechnet werden. Generalisierte Netze verfügen darüber hinaus über zahlreiche Operatoren, beispielsweise hierarchische und reduzierende. Kleinere Unterschiede sind etwa die Kanten-, Platz- und Markenkapazitäten und die Einführung von Prioritäten für Transitionen, Plätze und Marken.

Für eine rechnergestützte Modellierung lassen sich die Elementstrukturen beider beschriebenen Modellierungstechniken – UML und GN – vorteilhafterweise in einer XML-Struktur (*eXtensible Markup Language*, [7]) abbilden. Für das UML-Modell wird das von der OMG (*Object Management Group*) vorgeschriebene Austauschformat XMI (*XML for Metadata Interchange*, [8]) verwendet, für das GN-Modell wird eine proprietäre XML-Abbildung, genannt XGN (*XML for Generalized Nets*), vorgeschlagen. Softwaretechnisch handelt es sich bei der Überführung von UML-

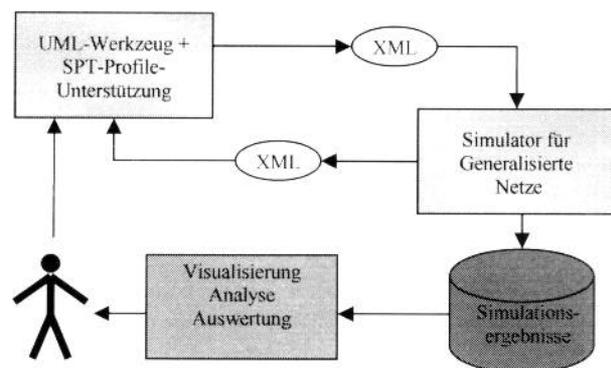


Abbildung 1. Simulationsbasierte Leistungsanalyse von UML-Modellen mittels Generalisierten Netzen

Modelle in GN-Modelle um eine XML-Transformation mittels XML-Stylesheets (XSL, [9]). Nach dieser Transformation können mit dem äquivalenten GN-Modell Simulationsexperimente zur Leistungsanalyse durchgeführt werden. Für diese Aufgabe kommt ein in Kooperation mit der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften entwickelter Simulator für Generalisierte Netze zum Einsatz (siehe Abbildung 1, vgl. [10]). Der Simulator erlaubt die Beurteilung von Leistungseigenschaften wie die Einhaltung von geforderten Antwortzeiten oder des gewünschten Bereichs für Auslastung oder Durchsatz einer verwendeten Ressource. Weiterhin kann das Verhalten des Systems bei einer bestimmten Häufigkeit von extern erzeugten Ereignissen analysiert oder es können Engpässe im Modell lokalisiert werden. Teile dieser Analyseergebnisse sind wiederum im Format des SPT-Profiles darstellbar und können damit in das für die Modellerstellung verwendete UML-Werkzeug zurückgeführt werden. Spezifische Analyseergebnisse werden mittels eines Auswertewerkzeuges für den Systemmodellierer geeignet visualisiert (siehe Abbildung 1).

Das Vorgehen wird durch ein ausgewähltes Beispiel illustriert.

Literatur:

- [1] A. Schmietendorf, E. Dimitrov, Kr. Atanassov: *The use of generalized nets within tasks of software engineering*; Proceedings of the Second International Workshop of Generalized nets; Sofia, 2001
- [2] Unified Modeling Language: <http://www.uml.org>; <http://www.oose.de/uml.htm>
- [3] SPT-Profil: <http://www.omg.org/technology/documents/formal/schedulability.htm>
- [4] Schnieder, Eckehard: *Methoden der Automatisierung*; Vieweg Verlag, 1999, ISBN 3-528-06566-4.
- [5] Petri, Carl Adam: *Kommunikation mit Automaten*; Dissertation; Bonn, 1962
- [6] Atanassov, Krassimir: *Generalized nets*; World Scientific Publ. Co., 1991, ISBN 981-02-0598-8.
- [7] XML: <http://www.w3.org/XML/>
- [8] XMI: <http://www.omg.org/technology/documents/formal/xmi.htm>
- [9] XSLT: <http://www.w3.org/Style/XSL/>
- [10] Zentrales Labor für Biomedizinisches Engineering, Bulgarische Akademie der Wissenschaften: <http://www.clbme.bas.bg>; <http://generalised.net>

Ein Konzept zur aktiven Schwingungsdämpfung von Schienenfahrzeug-Wagenkästen

C. Benatzky *

* Institut für Mechanik und Mechatronik
Abteilung für Regelungstechnik und
Prozessautomatisierung
Technische Universität Wien
Gusshausstraße 27-29 E325/A5
+43 1 58801 32817
+43 1 58801 32899
benatzky@impa.tuwien.ac.at

M. Kozek**

** Institut für Mechanik und Mechatronik
Abteilung für Regelungstechnik und
Prozessautomatisierung
Technische Universität Wien
Gusshausstraße 27-29 E325/A5
+43 1 58801 32812
+43 1 58801 32899
joergl@impa.tuwien.ac.at

Schlüsselwörter: Schienenfahrzeugtechnik, aktive Schwingungsdämpfung, μ -Synthese;

In diesem Beitrag werden Simulations- und experimentelle Ergebnisse zur Auslegung eines Regelkonzeptes zur aktiven Schwingungsdämpfung von Metrofahrzeug-Wagenkästen präsentiert. Ziel des vorgeschlagenen Konzeptes ist neben der Erhöhung des Fahrkomforts für die Passagiere auch die Fertigung von mechanisch einfacheren Rohbaustrukturen. Damit ist neben einer Minderung der Fertigungszeit auch eine Reduktion der Fahrzeugmasse möglich, wodurch die notwendige Antriebsenergie reduziert werden kann. In Summe ergeben sich Kostenvorteile sowohl bei der Fertigung als auch im Betrieb des Schienenfahrzeuges.

Ein entsprechendes Regelsystem bedingt die Platzierung von Sensoren und Aktoren an geeigneten Stellen des Wagenkastens. Da als Stellglieder Piezostapelaktoren und als Sensoren Piezopatches verwendet werden sollen zeigt sich, dass als Optimalpositionen für beide Komponenten Positionen an den Langträgern unterhalb der Ecken der Türauschnitte in Frage kommen. Da an diesen Positionen aufgrund der reduzierten Schubsteifigkeit große lokale Deformationen auftreten („S-Schlag“) ergibt sich Optimalität hinsichtlich der zur Struktur transferierten Energie (Steuerbarkeit) als auch im Sinne eines maximalen Sinal-zu-Rausch-Verhältnisses (Beobachtbarkeit).

Für die Auslegung des Reglers selbst ist neben einer möglichst großen Reduktion der auftretenden Beschleunigungen auch eine möglichst große Robustheit gegenüber im Entwurfsmodell vernachlässigten höheren Moden und Unsicherheiten in den modalen Parametern (Eigenfrequenzen ω_i und modale Dämpfungen ζ_i) des Modells zu erzielen. Aufgrund der hohen Flexibilität eines schweren Metro-Fahrzeuges ergibt sich eine große Anzahl von elastischen Moden im unteren Frequenzbereich. Eine Modellreduktion vor dem Reglerentwurf ist somit unerlässlich um eine brauchbare Reglerordnung zu erzielen. Deshalb muss besonders auf das Spillover-Verhalten des geschlossenen Kreises geachtet werden.

Um die Eigenschaften unterschiedlicher Regler vergleichen zu können werden Zustandsraumregler (ausgelegt durch Pole-Placement) mit Kalman-Filter sowie Regler ausgelegt durch μ -Synthese verwendet [1,2]. Während bei der Auslegung der Zustandsraumregler Unsicherheiten keine Berücksichtigung finden, wird für die μ -Synthese die Unsicherheit im Frequenzbereich durch ein additives Unsicherheitsgewicht beschrieben. Damit wird den vernachlässigten höheren Moden Rechnung getragen. Eine Analyse der erzielten Performance als auch der Robustheitseigenschaften des geschlossenen Kreises zeigt dann, dass in beiden Fällen die μ -Regler den Zustandsreglern überlegen sind. Der Grund dafür liegt in der Form der Übertragungsfunktionen der jeweiligen Regler. Aufgrund der Verwendung additiven Unsicherheit für die μ -Synthese, stellen sich dabei Regler mit ausgeprägter Bandpass-Wirkung ein. Zusätzlich

ergibt sich für die μ -Regler ein hoher Roll-Off wodurch Spillover-Phänomene vermieden werden können. Dies ist mit den einfachen Zustandsreglern nicht möglich. Zur experimentellen Verifikation der Simulationsergebnisse wird ein 1:10 Labormodell des Wagenkastens einer schweren Metro verwendet.

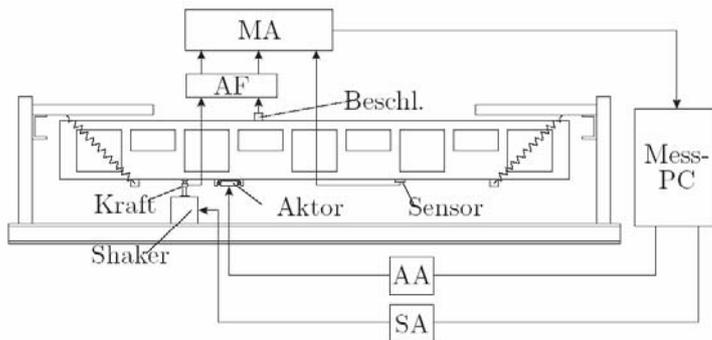


Abbildung 1: Schema des Prüfstandes

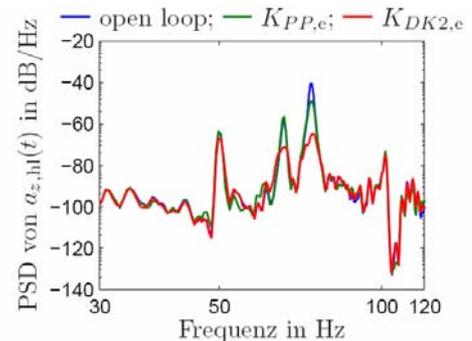


Abbildung 2: PSD der Beschleunigung am Modellende

Den Aufbau des Prüfstandes zeigt Abbildung 1. Das Modell mit einer Länge von 2,5m und einer Höhe und Breite von 0,25m wird durch Federn in einer Rahmenkonstruktion gelagert und zur Simulation der Gleisanregungen über eine beliebig an den Langträgern platzierbaren Shaker angeregt. Als Stellglieder kommen in einer Konsole gelagerte piezoelektrische Stapelaktoren zum Einsatz und als Messsignale werden von Piezopatches generierte Spannungen verwendet. Zusätzlich werden die Beschleunigungen als eigentliche Performancegrößen an mehreren Stellen des Modells gemessen. Die Implementierung der Regler erfolgt auf einem Labor-PC mit Hilfe von Matlab/SIMULINK\copyright.

Als Beispiel der erzielten Schwingungsreduktion ist in Abbildung 2 das Leistungsdichtespektrum der vertikalen Beschleunigung an der Vorderseite des Modells dargestellt. Man erkennt die Reduktion der Beschleunigungen im Bereich der ersten Biegeeigenfrequenz (64Hz) und der ersten Torsionseigenfrequenz (75Hz) im Falle des offenen Systems („open loop“) mit Hilfe eines Zustandsraumreglers ($K_{PP,e}$) und unter Verwendung eines μ -Reglers ($K_{DK2,e}$). Ein Vergleich der Ergebnisse erzielt mit unterschiedlichen Reglern zeigt somit, dass mit den μ -Reglern sowohl höhere Performance als auch Robustheit erzielt werden kann, da eine Erhöhung der Wirkung des Zustandsraumreglers zu einer Destabilisierung des geschlossenen Kreises führt. Damit ist gezeigt, dass für das vorliegende Problem, die aktive Schwingungsdämpfung eines Schienenfahrzeug-Wagenkastens, ein Reglerentwurf durch μ -Synthese aufgrund der erzielten Bandpasswirkung im Sinne von Performance und Robustheit von Vorteil ist.

Literatur:

- [1] S. Skogestad and I. Postlethwaite. *Multivariable Feedback Control*. John Wiley & Sons, 1996.
- [2] G.J. Balas, J.C. Doyle, K. Glover, A. Packard, and R. Smith. *μ -Analysis and Synthesis Toolbox – Version 3*. MUSYN Inc., Minneapolis, 2001.

Ermittlung des Schwimmwinkels mittels Extended Kalman-Filter auf Basis eines nichtlinearen Modells der Längs- und Querdynamik

Anne von Vietinghoff *

Uwe Kiencke**

*Institut für Industrielle Informationstechnik
Universität Karlsruhe (TH)
Hertzstraße 16
0721-608-4524
0721-608-4500
vietinghoff@iit.uni-karlsruhe.de

**Institut für Industrielle Informationstechnik
Universität Karlsruhe (TH)
Hertzstraße 16
0721-608-4520
0721-608-4500
kiencke@iit.uni-karlsruhe.de

Schlüsselwörter: Schwimmwinkel, Kraftfahrzeug-Querdynamik, Extended Kalman-Filter, nichtlinear

Der Schwimmwinkel gilt als Schlüsselgröße zur Beurteilung der Kraftfahrzeug-Querdynamik. Er ermöglicht eine direkte Beurteilung der Fahrsituation. Ein großer Absolutwert oder schnelle Änderungen deuten auf kritische Fahrsituationen hin. Gelingt es, den Schwimmwinkel zuverlässig zu ermitteln, wird es möglich, kritische Fahrsituationen zu erkennen und aktiv in das Fahrverhalten einzugreifen. Für die Messung des Schwimmwinkels stehen bisher keine Sensoren zur Verfügung, die für den Serieneinsatz geeignet wären. Daher muss er auf Basis von Modellen ermittelt werden.

Dieser Arbeit liegt ein nichtlineares Modell der Kraftfahrzeug-Querdynamik in Zustandsraumdarstellung zu Grunde [1]. Dieses Modell geht davon aus, dass die Radlängskräfte, also die Antriebs- und Bremskräfte, bekannt sind. Ziel dieser Arbeit ist es aber, nur solche Größen zu verwenden, die in einem Serienfahrzeug auch tatsächlich zur Verfügung stehen. Daher wird das Modell um ein einfaches Modell der Kraftfahrzeuglängsdynamik erweitert, das aus den Vorgaben des Fahrers die aktuellen Radlängskräfte ermittelt. Die für das Modell notwendigen Fahrzeugparameter werden über eine Identifizierung bestimmt.

Die Nichtlinearität des zu Grunde liegenden Modells erfordert den Einsatz eines nichtlinearen Schätzers. In dieser Arbeit fällt die Wahl auf ein Extended Kalman-Filter (EKF). Im Gegensatz zu einem nichtlinearen Beobachter bietet es die Möglichkeit, Modellungenauigkeiten explizit zu berücksichtigen und den korrigierenden Eingriff des Filters der aktuellen Fahrsituation anzupassen. So ist bekannt, dass das hier verwendete Modell der Längsdynamik den Schaltvorgang nur unzureichend beschreibt. Daher wird während des Schaltvorgangs der entsprechende Anteil der Kovarianz des Systemrauschens auf einen hohen Wert gesetzt und das Modell verlässt sich hauptsächlich auf die Messwerte. Sobald die Kupplung wieder geschlossen wird, wird die Kovarianz des Systemrauschens wieder verringert und das EKF berücksichtigt das Modell entsprechend stärker.

Als messbare Ausgangsgrößen werden die vier Raddrehzahlen, die Gierrate sowie die Längs- und die Querbeschleunigung verwendet. Dies resultiert in einer nichtlinearen Messgleichung der Dimension sieben. Die Berechnung der Filterverstärkung erfordert somit die Inversion einer (7x7)-Matrix. Um den damit verbundenen Rechenaufwand zu reduzieren, wird ein weiteres Extended Kalman-Filter aufgestellt, das mit einer linearen Ausgangsgleichung arbeitet. In einem ersten Schritt werden hierzu die Messgrößen in die Zustandsgrößen umgerechnet, die dann in einem zweiten Schritt als Ausgangsgrößen aufgefasst werden. Zusätzlich

ermöglicht die Kombination der vier Raddrehzahlen zur Berechnung der Geschwindigkeit eine einfache Fehlerminimierung in hochdynamischen Fahrsituationen: Wird stark beschleunigt, tritt an den Antriebsrädern ein größerer Schlupf auf. In diesem Fall errechnet sich die Geschwindigkeit lediglich aus dem Mittelwert der beiden nicht angetriebenen Räder. In allen anderen Fahrsituationen wird die Geschwindigkeit aus dem Median der vier Geschwindigkeiten, die sich aus den Raddrehzahlen ergeben, berechnet. Damit fallen einzelne blockierende Räder aus der Berechnung heraus. Darüber hinaus kann die Varianz der aus den Raddrehzahlen errechneten Geschwindigkeiten direkt als Maß für die Zuverlässigkeit dieser Geschwindigkeiten verwendet werden: Je größer die Varianz ist, desto unzuverlässiger sind diese fiktiven Messwerte. Die Varianz kann damit zur situationsabhängigen Festlegung der Kovarianz des Messfehlers eingesetzt werden.

Um eine Aussage über die Qualität der Kalman-Filter zu machen, wird auch die Robustheit gegenüber Parameterschwankungen untersucht. Betreffen diese Schwankungen Fahrzeugparameter, die im wesentlichen messbare Größen beeinflussen, wie die Fahrzeugmasse oder Trägheitsmomente im Antriebsstrang, kann der entstehende Fehler durch Rückführung der Messwerte ausgeglichen werden. Parameterschwankungen, die sich direkt auf den nicht messbaren Schwimmwinkel auswirken, wie die Lage des Schwerpunkts oder ein nicht kompensierter Offset des Gierratensensors, haben eine deutliche Auswirkung auf die Qualität der Schätzung. Werden diese Parameter als zusätzliche Systemzustände aufgefasst, können sie mitgeschätzt werden, unter der Voraussetzung, dass sie sich nur langsam ändern. Dies wird anhand eines Offsets im Gierratensensor gezeigt.

Die Validierung der Extended Kalman-Filter erfolgt mit der Software CarMaker®. Sie bietet ein detailliertes Fahrzeugmodell einschließlich Fahrer und typischer Fahrmanöver. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die beiden Extended Kalman-Filter in der Lage sind, aus in Serienfahrzeugen vorhandenen Messgrößen den Schwimmwinkel zuverlässig zu schätzen.

Literatur:

- [1] A. von Vietinghoff, M. Hiemer and U. Kiencke: Nonlinear Observer Design for Lateral Vehicle Dynamics. IFAC World Congress 2005, Prag, Tschechische Republik
- [2] M. S. Grewal and A. P. Andrews: Kalman filtering: Theory and Practice using MATLAB. Wiley, New York, 2001
- [3] S. Germann: Modellbildung und modellgestützte Regelung der Fahrzeuglängsdynamik. VDI Fortschrittsberichte, Reihe 12, Nr. 309. VDI Verlag, Düsseldorf, 1997.

Regelung von Schwingungsprüfständen mittels Iterativ Lernender Regelungen im Frequenzbereich

Dr.-Ing. Hellmar Rockel *

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski **

* Institut für Elektrische Informationstechnik
Technische Universität Clausthal
Leibnizstr. 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel. 05323-72-2629
Fax 05323-72-3197
hellmar@iei.tu-clausthal.de

** Institut für Automatisierungstechnik
Technische Universität Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt
Tel. 06151-16-3014
Fax 06151-16-6114
ukonigorski@iat.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: Iterativ Lernende Regelungen, zyklische Prozesse, Schwingungsprüfstände

Im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte wurden Iterativ Lernende Regelungen (ILRen) unter den verschiedensten Aspekten analysiert und Lernalgorithmen für viele unterschiedliche Systemklassen und Anwendungen entwickelt. Mehrere Versuche wurden unternommen, ein allgemeines Rahmenwerk zu schaffen, denen es jedoch zumeist an intuitiver Zugänglichkeit und Anschaulichkeit mangelte und die sich darum nicht in der Praxis durchgesetzt haben. Im linearen Falle hat sich eine parametrische Beschreibung etabliert. Sie bildet die Grundlage für den hier präsentierten allgemeinen Rahmen für ILRen. Er stellt die vollständige Einbettung in die diskrete lineare Systemtheorie dar. Neben der Anschaulichkeit, die dieser Zugang bietet, ist er jedoch auch sehr allgemein. Es lassen sich strukturell sowohl parallele und serielle Kombinationen von Lerngesetz und konventioneller Regelung als auch Lerngesetze höherer Ordnung integrieren. Er besitzt außerdem Gültigkeit für beliebige Parametrisierungen, so daß neben den praktikablen Sichtweisen im Zeit- und Frequenzbereich auch Betrachtungen mit Hilfe beliebiger Basisfunktionen möglich sind.

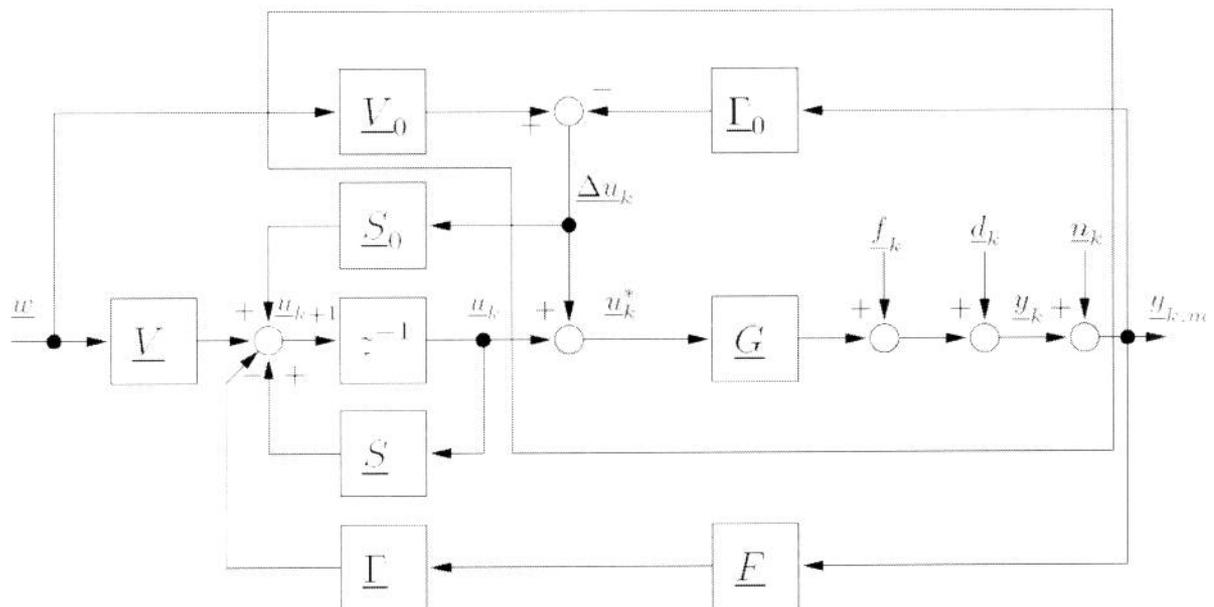


Abbildung 1: Struktur einer ILR mit unterlagelter Regelung in Parallelstruktur)

Die Ausführungen lassen sich im Frequenzbereich sehr kompakt konkretisieren. Durch die FFT aller relevanten Signale und die Charakterisierung sämtlicher Übertragungsglieder durch ihren diskreten Frequenzgang erhält man zwar eine komplexe, jedoch skalare Übertragungsgleichung für jede zu betrachtende Frequenz. Ein Polvorgabe-Entwurfsverfahren wird vorgestellt, das leicht zu implementieren ist und über gute Robustheitseigenschaften

gegenüber Modellunsicherheiten verfügt. Es läßt sich zeigen, daß das vorgeschlagene Verfahren in Abhängigkeit der geforderten Dynamik (Lerngeschwindigkeit) Modellunsicherheiten von bis zu mehreren hundert Prozent vom Nominalmodell (Nominalfrequenzgang) zuläßt. Mit den im Zuge der Analyse definierten Robustheitskreisen liegt außerdem ein einfaches und anschauliches Werkzeug für die Anwendung des Verfahrens vor. Bei der Kombination von Lerngesetz und unterlagerter konventioneller Regelung kann der Entwurf durch zweistufige Polvorgabe erfolgen. Die Robustheitsbetrachtungen sind hierbei direkt übertragbar.

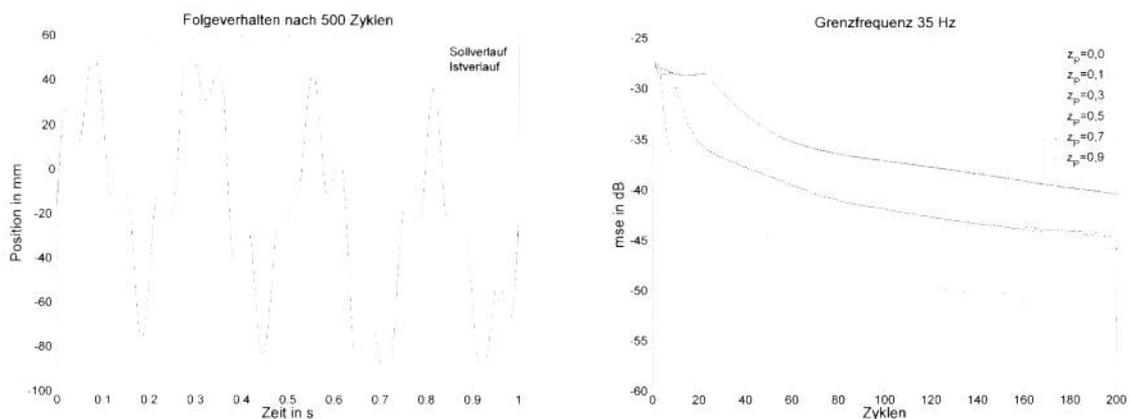


Abbildung 2: Folgeverhalten und MSE-Entwicklung am pneumatischen Prüfstand

Das Verfahren läßt sich besonders gut auf regelungstechnische Aufgabenstellungen anwenden, die bei Schwingversuchen in der Betriebsfestigkeit auftreten. Das vorgestellte Entwurfsverfahren wird auf pneumatische und hydraulische Prüfstände angewandt und zeigt dort exzellente Ergebnisse. Insbesondere zeigt sich, daß auch bei sehr unsicheren Streckenmodellen eine hohe Regelgüte erzielbar ist.

Literatur:

- [1] Rockel, H.; Konigorski, U.: Parametric Iterative Learning Control – A New Approach, Proc. of the 49th IWK Ilmenau, S. 405-411, Shaker Verlag, 2004
- [2] Rockel, H.; Konigorski, U.: Parametric Iterative Learning Control in the Time and Frequency Domain, Proc. of the Intern. Workshop on Automatic Learning and Real Time, Universität Siegen, S. 57-64, 2005
- [3] Rockel, H.; Konigorski, U.: Time and Frequency Domain Pole Placement in Parametric Iterative Learning Control, ICGST International Journal on Automatic Control and Systems Engineering, ACSE, 2006

Verzahnung von modellbasiertem Reglerentwurf und modellbasierter Softwareentwicklung

Dipl.-Inform. Andreas Polzer

Prof. Dr.-Ing. Stefan Kowalewski

Lehrstuhl Informatik 11
RWTH Aachen
Ahornstr. 55
Tel. 0241 – 80 211 60
Fax 0241 – 80 211 50
{polzer, kowalewski}@cs.rwth-aachen.de

Schlüsselwörter: Modellbasierter Softwareentwurf, Anforderungsanalyse, funktionale Anforderungen, nichtfunktionale Anforderungen

Bei der Entwicklung softwareintensiver eingebetteter Systeme in regelungstechnischen Anwendungen wie z.B. Motorsteuergeräten treffen zwei Disziplinen aufeinander, die sich in der Vergangenheit weitgehend getrennt von einander entwickelt haben: die Softwaretechnik und die Regelungstechnik. Das Zusammenwirken der beiden Disziplinen läuft in der Praxis nicht reibungslos: Unterschiedliche Begriffswelten und Perspektiven auf den Entwurfsgegenstand verursachen Missverständnisse. Die fehlende Abstimmung im Entwurfsvorgehen verhindert die durchaus mögliche gegenseitige methodische Ergänzung. Im Ergebnis wird erhebliches Potenzial zur effizienteren Erzielung von Qualität, insbesondere Sicherheits- und Zuverlässigkeitseigenschaften, aber auch Wartbarkeit und Änderbarkeit von Regelungssoftware verschont. [1]

Die methodische Kopplung der beiden Disziplinen gründet sich auf der Tatsache, dass sowohl in der Regelungstechnik, als auch in der Softwaretechnik der modellbasierte Entwurf zur Entwicklung softwareintensiver Systeme eingesetzt wird. Die verwendeten Modelle betrachten zurzeit nur Aspekte der jeweiligen Fachdisziplinen. Aus diesem Grund werden die Modelle häufig von Grund auf neu erstellt. Viele Informationen könnten aber wiederverwendet werden, oder schon zu früheren Zeitpunkten im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden.

Ein Beispiel hierfür sind die funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen. Die Anforderungen sind bei Reglersoftware in der Praxis, z.B. bei der Entwicklung von Motorsteuerungen zu einem sehr frühen Zeitpunkt bekannt. Die Integration in den Entwurfsprozess der Regelungstechnik hilft dabei die Anforderungen schon bei der Reglerauslegung zu beachten.

Eine genaue Dokumentation des Entwurfprozesses zur Reglerentwicklung bildet die Grundlage zur Analyse funktionaler und nichtfunktionaler Anforderungen an den Regler sowie den Entwicklungsprozess. Die funktionalen Anforderungen lassen sich zusammenfassen zur Stabilität, Regelgüte, Robustheit und dem Ressourcenbedarf.

Die ersten drei Anforderungen fallen direkt in den Bereich der Regelungstechnik. Der Ressourcenbedarf hat hingegen weit reichende Auswirkungen auf nichtfunktionale Anforderungen.

Eine wichtige Anforderung, die sich aus dem Ressourcenbedarf ergibt ist die Skalierbarkeit. Die Skalierbarkeit ermöglicht es den Rechenzeitbedarf eines Reglers einzustellen. Die Veränderung der Rechenzeit erfolgt durch Austausch von Komponenten des Reglers. Der Austausch betrifft vor allem die Optimierungsverfahren.

Die Veränderung des Reglers durch Verwendung verschiedener Optimierungsalgorithmen hat zur Folge, dass weitere nichtfunktionale Anforderungen an den Regler gestellt werden. Diese sind in der Hauptsache die Wiederverwendbarkeit und Wartbarkeit.

Die Wiederverwendbarkeit der Optimierungsverfahren soll gewährleisten, dass diese unabhängig von der Größe des Zustandsraums einsetzbar sind.

Zudem ist Wartbarkeit des Reglers eine wichtige Eigenschaft, die es z.B. ermöglichen soll, schnelle Änderungen am Zustandsraum zu realisieren. Des Weiteren sind bei der Analyse nichtfunktionaler Anforderungen an die Reglerentwicklung im Bezug auf Testbarkeit, Dokumentation, Qualität, Zuverlässigkeit, Akzeptanz, Diagnosefähigkeit und Datensicherheit formuliert worden. Diese nichtfunktionalen Anforderungen sind auf Grundlage einer Aufzählung in [2] erstellt worden.

Weitere Analysen müssen zeigen in welchen Bereichen sich diese Anforderungen beim Regler bzw. bei der Reglerentwicklung auswirken. Zudem müssen Vorschläge für Maßnahmen erfolgen, die eine Umsetzung der nichtfunktionalen Anforderungen ermöglichen. Die entwickelten methodischen Ansätze werden im Bereich Motorsteuerungen mit mehreren Partnern erprobt.

Literatur:

- [1] S. Kowalewski: Discrete control systems for cars – quality is more than correct function. Preprints 7th Int. Workshop on Discrete Event Systems, 22.-24. September 2004, Reims, France, pp. 13-14.
- [2] Len Bass, Paul Clements, Rick Kazman: Software Architecture in Practice; Addison-Wesley, Second Edition 2003.

Optimale Betriebsführung von Mini-Brennstoffzellen

*Jens Niemeyer

**Volker Krebs

* Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstraße 12
Tel.: 0721-608-3183
Fax: 0721-608-2707
niemeyer@irs.uni-karlsruhe.de

** Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstraße 12
Tel.: 0721-608-3180
Fax: 0721-608-2707
krebs@irs.uni-karlsruhe.de

Schlüsselwörter: PEM-Brennstoffzelle, physikalische Modellierung, Zustandsschätzung, optimale Regelung

Brennstoffzellen ermöglichen die direkte Wandlung chemischer in elektrische Energie. Dabei unterliegen sie nicht dem Carnot-Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen und ermöglichen dadurch prinzipiell höhere Wirkungsgrade. Verschiedene Typen von Brennstoffzellen unterscheiden sich nach physikalischem Aufbau und Wirkungsweise. Bei den Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen, kurz PEM-Brennstoffzellen, handelt es sich um Systeme, die schon bei Raumtemperatur betrieben werden können. Als Brenngase werden Wasserstoff und Sauerstoff bzw. Luft verwendet. Da auch kompakte PEM-Systeme aufgebaut werden können, eignet sich dieser Brennstoffzellen-Typ besonders für kleine, mobile Anwendungen.

Am Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS) wird in Zusammenarbeit mit zwei Fraunhofer-Instituten beispielhaft eine Anwendung für PEM-Brennstoffzellen untersucht. Dabei handelt es sich um den in Abbildung 1 dargestellten autonom agierenden Staubsaugerroboter, dessen Energieversorgung durch ein Brennstoffzellen-System vorgenommen wird. Der Roboter ist durch Kartierung des zu bearbeitenden Gebietes in der Lage, eine intelligente Navigationsstrategie umzusetzen. Damit ist es möglich, den Leistungsbedarf des Robotersystems vorherzusagen.

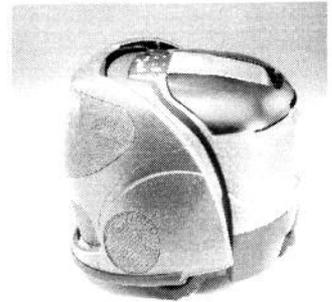


Abbildung 1: autonom agierendes Robotersystem

Für den Betrieb des Systems wird ein Regelungskonzept zur optimalen Betriebsführung entwickelt. Dabei müssen günstige Betriebsbedingungen durch den aufgeprägten Laststrom und die Temperatur des Systems gewählt werden. Außerdem muß eine ausreichende Versorgung mit den Brenngasen sichergestellt werden. Ziel ist es, einen dynamischen Betrieb des Brennstoffzellensystems zu ermöglichen, um so die abgegebene Leistung an den zeitlich veränderlichen Bedarf des Roboters anzupassen.

Die Entwicklung des Regelungskonzeptes erfordert eine physikalische Modellierung des Systems. Dazu werden die Massen- und Energiebilanzen gebildet und mit einem Modell der Membran und einem elektrischen Modell des Systems gekoppelt. Auftretende partielle Differentialgleichungen werden diskretisiert, so dass ein dynamisches Modell in Form nichtlinearer Differentialgleichungen vorliegt [1]. Die nichtlinearen physikalischen Effekte beeinflussen das Großsignal-Verhalten des Systems, so dass es zur Entwicklung des Regelungskonzeptes nicht ausreicht nur eine Linearisierung der Systemgleichungen zu berücksichtigen.

Auftretende Zustandsgrößen mit physikalischer Bedeutung, die in einer mobilen Anwendung nicht gemessen werden können, werden durch nichtlineare Zustandsschätzung mit dem Sigma-Punkt Kalman-Filter aus den messbaren Größen geschätzt. Ein Vorteil dieses Verfahrens gegenüber dem Extended Kalman-Filter besteht insbesondere darin, dass dabei keine partiel-

len Ableitungen der nichtlinearen Systemgleichungen (Jacobi-Matrizen) berechnet werden müssen.

Die Regelung des Systems kann dann als dynamisches Optimierungsproblem formuliert werden. Die vom Brennstoffzellensystem abgegebene Leistung soll optimal mit dem vom Robotersystem vorhergesagten Verbrauch übereinstimmen. Außerdem sollen Verluste in peripheren Komponenten des Systems wie Lüftern und Pumpen möglichst klein gehalten werden, um eine hohe Effizienz des Gesamtsystems zu erreichen. Durch das vorliegende, komplexe Modell wird eine numerische Lösung des Hamilton-Verfahrens vorgeschlagen. Die optimale Lösung wird dabei durch ein iteratives Verbessern der Steuerungsgleichung erreicht.

Das in [2] angegebene Verfahren wird dazu in mehreren Punkten modifiziert und an die Echtzeitproblematik angepaßt. An Stelle des einfachen Gradientenabstiegs werden effizientere Verfahren zur Bestimmung der Abstiegsrichtung und der Schrittweite bei der Optimierung verwendet. Die Abstiegsrichtung wird durch ein Quasi-Newton-Verfahren bestimmt (BFGS-Verfahren), die Schrittweite des Abstiegs wird durch das sogenannte Golden Section-Verfahren gewählt. Damit ist es möglich, Begrenzungen der Stellgrößen mit zu berücksichtigen. Eine weitere Möglichkeit die Rechenzeit zu reduzieren, besteht darin, dass eine geschickte Parametrierung für die Steuertrajektorien gewählt wird. Statt der Beschreibung der Stellgrößen in den diskreten Zeitpunkten des Integrationsverfahrens, wird der zeitliche Verlauf durch parametrische Darstellungen angegeben. Die gesamte Reglerstruktur ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Leistungsfähigkeit des Regelungskonzeptes wird an dem aufgebauten Demonstrator nachgewiesen. Dazu werden typische dynamische Lastwechsel des Roboters betrachtet.

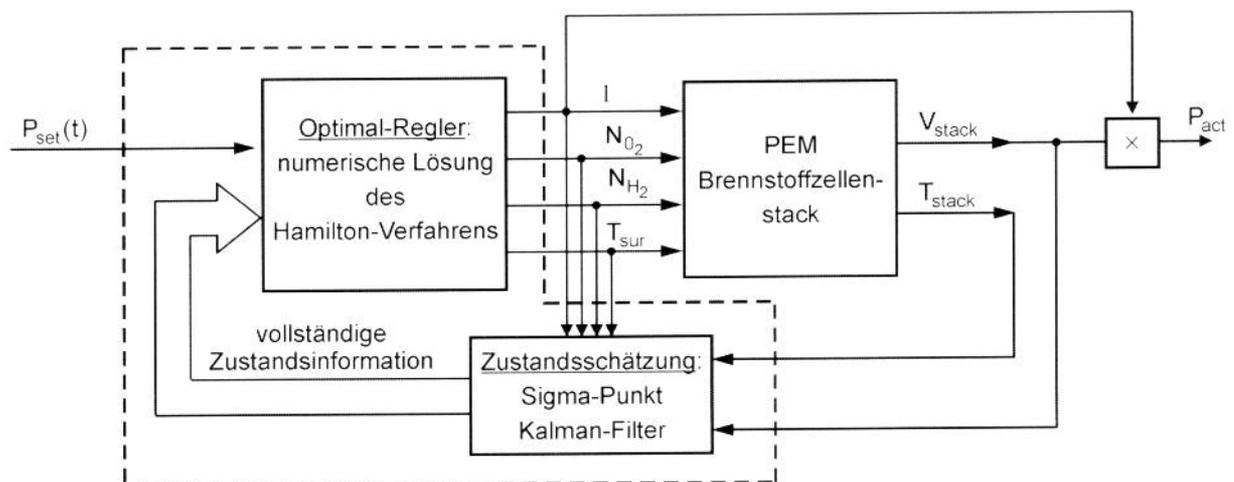


Abbildung 2: Reglerstruktur

Literatur:

- [1] Ziegler, Christoph; Philipps, Simon; Niemeyer, Jens; Schumacher, Jürgen: *Dynamic Modeling of a PEM Fuel Cell Stack*. 3rd European PEFC Forum, Lucerne, 2005.
- [2] Arthur E. Bryson: *Dynamic Optimization*. Addison-Wesley, 1999.

Modellierung und Regelung zur Unterdrückung des Skieffektes beim Grobblechwalzen

Thomas Kiefer *

Andreas Kugi **

* Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität des Saarlandes, Saarbrücken
Postfach 151150
+49 681 302 64728
+49 681 302 64722
thomas.kiefer@lrs.uni-saarland.de

** Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität des Saarlandes, Saarbrücken
Postfach 151150
+49 681 302 64721
+49 681 302 64722
andreas.kugi@lrs.uni-saarland.de

Schlüsselwörter: Walzwerk, Ebenheit, Skieffekt, Antriebsregelung

Beim Walzen von Grobblechen wird in mehreren so genannten Stichen die Dicke des Bleches unter Zunahme von Länge und Breite bis auf die gewünschte Enddicke reduziert. Die Umformung findet dabei bei Temperaturen zwischen 700 und 1200°C statt, die Walzkräfte betragen bis zu 100 MN und die beiden Antriebsmotoren besitzen jeweils eine Nennleistung von 8,6 MW.

Aufgrund von Asymmetrien im Walzspalt kann es beim Walzen zu dem unerwünschten Effekt kommen, dass sich das Walzgut an den Enden auf- oder abbiegt. Wegen der charakteristischen Form der Blechenden wird dieses Phänomen auch häufig als Skieffekt bezeichnet, siehe Abbildung 1. Die Skibildung beeinflusst einerseits die Qualität der Blechebenheit negativ und führt andererseits zu Problemen in den nachfolgenden Prozessschritten. Die Ursachen für die Asymmetrien sind in den meisten Fällen Unterschiede in den Walzenumfangsgeschwindigkeiten, Unterschiede in den Reibkoeffizienten zwischen Blech und den beiden Arbeitswalzen oder Temperaturgradienten über die Blechdicke.

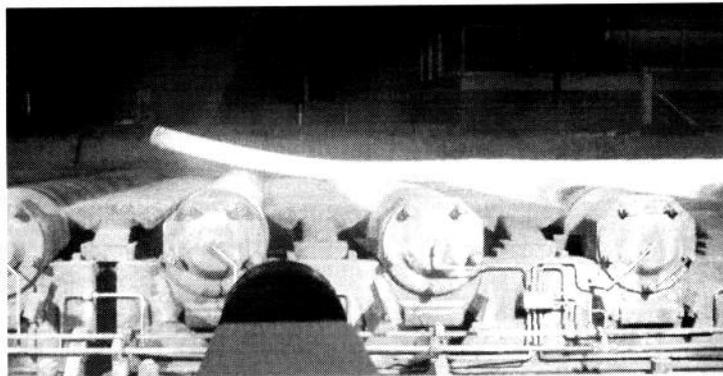


Abbildung 1: Skieffekt beim Walzen von Grobblech

Die Schwierigkeit bei der Modellierung dieses Skieffektes liegt in der Tatsache, dass sein Auftreten nicht ausschließlich von den Asymmetrien selbst sondern auch von der Walzspaltgeometrie abhängt. So kann gezeigt werden, dass beim Walzen mit unterschiedlicher Umfangsgeschwindigkeit von Ober- und Unterwalze sich das Material bei kleinen Stichabnahmen von der schnelleren Walze weg biegt, wohingegen bei größeren Stichabnahmen eine Biegung des Materials zur schnelleren Walze erfolgen kann.

In diesem Beitrag werden zunächst die mathematischen Modelle zur Beschreibung des asymmetrischen Walzens vorgestellt, welche in weiterer Folge als Grundlage zur Entwicklung einer Regelungsstrategie dienen. Während die meisten zu diesem Thema bekannten Arbeiten auf Finite-Elemente (FE) Berechnungen beruhen (z.B. [4], [6]), wird hier ein semi-analytisches Modell auf Basis der Schrankenverfahren der Plastizitätstheorie hergeleitet, siehe [1], [2], [3], [5], [7]. Der Vorteil dieses Verfahrens im Vergleich zu rein numerischen Methoden liegt in der deutlichen Reduktion der Rechenzeiten, wodurch erst ein Einsatz zur Vorhersage und zur Unterdrückung eines zu erwartenden Skis während des Prozesses ermöglicht wird. Die Güte dieses Modells wird anhand von FE-Simulationen und Messkampagnen nachgewiesen.

Zur Vermeidung von Skienden werden nun zwei Strategien verfolgt: Einerseits wird das klassische Regelungskonzept der beiden Antriebsmotoren von Ober- und Unterwalze durch eine neue flachheitsbasierte Regelung so ersetzt, dass eine vorgegebene Drehzahldifferenz zwischen oberen und unterem Antriebsmotor eingestellt werden kann. Andererseits wird jeweils zwischen den Stichen mit Hilfe des semi-analytischen mathematischen Modells des asymmetrischen Walzspaltes der für den folgenden Stich zu erwartende Ski beispielsweise aufgrund von gemessenen Unterschieden in den Oberflächentemperaturen von Ober- und Unterseite des Bleches berechnet. Auf Basis dieser Berechnung wird dann in einem weiteren Schritt ein Sollverlauf für die Geschwindigkeitsdifferenz der Walzenantriebsmotoren beim nächsten Anstich so ermittelt, dass ein Auftreten des Skis vermieden wird.

Literatur:

- [1] Hill, R., The mathematical theory of plasticity, Oxford University Press, Oxford, 1986.
- [2] Kiefer, T., Heeg, R., Kugi A., Fichet O., Bödefeld B., Irastorza L., Controller Design based on analytical models for heavy plate mills, CD-Proc. of the 9th International and 4th European Steel Rolling Conferences (Steel Rolling 2006), Paris, France, June 19-21, 2006.
- [3] Kiefer, T., Kugi, A., Front end bending caused by asymmetrical rolling conditions: an analytical approach, Proc. of the 5th MATHMOD Conference, Vienna, February 8-10, 2006.
- [4] Kobayashi, S., Oh, S., Altan, T., Metal forming and the Finite-Element method, Oxford University Press, Oxford, 1989.
- [5] Kopp, R., Wiegels, H., Einführung in die Umformtechnik, Wissenschaftsverlag Mainz, 1999.
- [6] Lenard, J.G., Pietrzyk, M., Cser, L., Physical simulation of the properties of hot rolled products, Elsevier Science Ltd., Oxford, 1999.
- [7] Pawelski, H., Comparison of methods for calculating the influence of asymmetry in strip and plate rolling, Steel Research 71, No. 12, pp. 490-496, 2000.

Möglichkeiten zur Verbesserung der Klopfregelung in zylinderdruckgeführten Motorsteuerungen

Dipl.-Ing. Ulf Lezius
IAV GmbH
Rockwellstr. 16
38518 Gifhorn

Dipl.-Ing. M. Schultalbers
IAV GmbH
Rockwellstr. 16
38518 Gifhorn

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. B. Lampe
Universität Rostock
Inst. für Automatisierungstechnik
Richard-Wagner-Str. 31 / H8
18119 Warnemünde

Schlüsselwörter: Klopfen, Klopfregelung, Selbstzündung, Ottomotor, Motorsteuerung

Klopfen ist ein abnormales Verbrennungsphänomen. Die Energiefreisetzung während des Arbeitstaktes bewirkt eine starke Zunahme der Temperatur und des Drucks im Zylinder. Durch den Druckanstieg werden auch die bis dahin noch unverbrannten Gase komprimiert, was wiederum mit einer Erhöhung der Temperatur in der unverbrannten Gemischzone einhergeht. Wenn Druck und Temperatur in der unverbrannten Zone zu groß werden, können sich die betroffenen Teile des Kraftstoff-Luft-Gemisches von selbst entzünden, ohne dass sie durch die von der Zündkerze ausgehende Flammenfront erfasst werden [1].

Die besonders zündwillige Konditionierung der unverbrannten Gemischzone bewirkt einen raschen Stoff- und Energieumsatz nach der Selbstzündung. Durch diesen Impuls werden die Gase im Brennraum zu Resonanzschwingungen angeregt. Diese Schwingungen sind das typische Merkmal klopfender Verbrennungen. Das damit verbundene metallisch klingende Geräusch hat dem Phänomen der unkontrollierten Selbstzündung im Brennraum auch den Namen "Klopfen" gegeben.

Da klopfende Verbrennungen den Motor beschädigen bzw. zerstören können [1], muss das Auftreten solcher Selbstzündungen verhindert werden. Üblicherweise wird eine Spätverstellung des Zündzeitpunktes genutzt, um die Klopfneigung des Motors zu reduzieren. Dies geht aber mit Einbußen hinsichtlich des abgegebenen Drehmoments bzw. des erreichten Wirkungsgrades einher. Moderne Ottomotoren werden daher meist mit einer Klopfregelung ausgestattet, die den Zündzeitpunkt möglichst in der Nähe der Klopfgrenze einstellt [2]. Damit soll sichergestellt werden, dass der Motor das maximal mögliche Drehmoment abgibt, ohne dass durch zu häufiges oder zu starkes Klopfen ein Schaden am Motor entsteht.

Üblicherweise arbeitet ein Klopfregler in etwa wie ein nichtlinearer Maximalwertregler [3], [2]. Die für klopfende Verbrennungen typischen Resonanzschwingungen des Brennraums werden mit Hilfe geeigneter Sensoren (z.B. Beschleunigungssensoren, Ionenstromsensoren, Brennraumdrucksensoren) erfasst. Überschreitet die Signalenergie oder die Amplitudenhöhe in typischen Frequenzbereichen einen bestimmten Schwellwert, so wird das betreffende Arbeitsspiel als klopfend eingestuft. Nach einem solchen Klopfereignis wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch in den darauf folgenden Arbeitsspielen deutlich später gezündet. Mit den dabei reduzierten Drücken und Temperaturen im Brennraum wird das erneute Auftreten von Klopfen zuverlässig verhindert.

Sollte dagegen kein Klopfen auftreten, so wird die Zündung so lange wieder zu früheren Zeitpunkten hin verstellt, bis erneut Klopfen auftritt. Auf diese Weise wird es ermöglicht, den Zündwinkel relativ dicht an der Klopfgrenze zu betreiben und gleichzeitig sicherzustellen, dass der Motor nicht beschädigt wird.

Solche Klopfregler benutzen keine Informationen über den Abstand zur Klopfgrenze. Deswegen müssen sie defensiv ausgelegt werden. Nach klopfenden Verbrennungen erfolgt ein starker Zündwinkelingriff nach "Spät". Wenn keine klopfenden Verbrennungen auftreten, erfolgt die Verstellung des Zündwinkels nach "Früh" sehr langsam. Während solcher Phasen "verschenkt" die Regelung Drehmoment und Wirkungsgrad.

Eine vorteilhaftere Variante ist es, dem Klopfregler eine zusätzliche relevante Messgröße zur Verfügung zu stellen. Diese sollte möglichst direkt an das auslösende Moment klopfender Verbrennung gekoppelt sein.

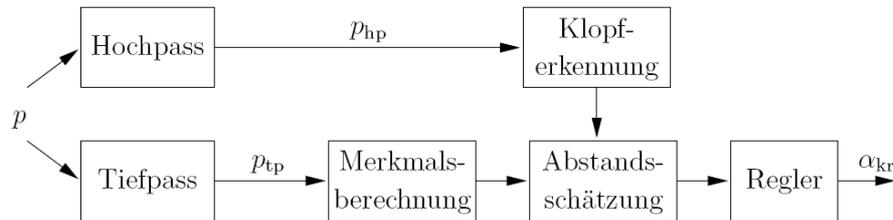


Abbildung 1 Vorschlag für einen abstandsasierten Klopfregler

In Abbildung 1 ist eine Grobstruktur für einen neuen Regelungsansatz dargestellt. Das gemessene Zylinderdrucksignal p wird hier auf zwei getrennten Pfaden verarbeitet. Ein hochpassgefiltertes Zylinderdrucksignal p_{hp} wird für die Erkennung klopfender Arbeitsspiele genutzt. Das über einen Tiefpass gefilterte Signal p_{tp} enthält zwar keine hochfrequenten Klopferschwingungen mehr, kann aber ausgewertet werden, um bestimmte Merkmale des Zylinderdrucks zu berechnen. Dabei bieten sich unterschiedliche Zylinderdruckmerkmale zur Bestimmung des Abstandes zur Klopfgrenze an.

Beispiele für solche Merkmale sind:

- Bewertung der Form des Druckverlaufs (z.B. Maximum des Zylinderdruckverlaufs, maximaler Anstieg des Zylinderdruckverlaufs)
- Merkmale, bzw. Parameter des Brennverlaufs (z.B. Brennbeginn, Brennende)
- Reaktionskinetische Maße (z.B. Reaktionsniveau nach Franzke [4])

Mit Hilfe der Klopfenerkennung wird eine Klopfgrenze für das berechnete Merkmal bestimmt. Dies erlaubt es dann, für jedes Arbeitsspiel den Abstand zur dieser Klopfgrenze zu quantifizieren. Diese Information wird dem Regler zugeführt, welcher den Stelleingriff α_{kr} berechnet. Starke Regeleinriffe nach klopfenden Verbrennungszyklen sind mit dieser Lösung nicht erforderlich. So lassen sich das abgegebene Drehmoment und der Wirkungsgrad des Ottomotors im klopfbegrenzten Betriebsbereich steigern [5], [6].

Literatur

- [1] Pischinger, Franz: Abschlußbericht Sonderforschungsbereich 224 Motorische Verbrennung / Sonderforschungsbereich 224 an der RWTH Aachen. 2001. – Forschungsbericht
- [2] Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Ottomotor-Management. 2. Auflage. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2003
- [3] Kiencke, Uwe ; Nielsen, Lars: Automotive Control Systems for Engine, Driveline and Vehicle. 1. Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2000
- [4] Franzke, D. E.: Beitrag zur Ermittlung eines Klopfkriteriums der ottomotorischen Verbrennung und zur Vorausberechnung der Klopfgrenze, Technische Universität München, Dissertation, 1981
- [5] Lezius, Ulf ; Drewelow, Wolfgang ; Schultalbers, Matthias: Potenzial zur Verbesserung der Klopfregelung in Ottomotoren. In: 2. ASIM Workshop Wismar — Modellierung, Regelung und Simulation in Automotive und Prozessautomation. Wismar, 2004, S. 101–109
- [6] Lezius, Ulf ; Drewelow, Wolfgang ; Schultalbers, Matthias: Vergleich verschiedener Konzepte für die Klopfregelung. In: 11. Symposium Maritime Elektronik und Elektrotechnik — Arbeitskreis Steuerungs- und Regelungstechnik. Rostock, 2004, S. 53–57

Durchgängige Anforderungs-, System- und Testfallbeschreibung mit UML

Dipl.-Ing. Volker Knollmann

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Volker.Knollmann@dlr.de

Karsten.Lemmer@dlr.de

Tel.: 0531 / 295-3461

Fax: -3402

Tel.: -3401

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)

Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung

Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

Schlüsselwörter: Sicherungstechnik, UML, SysML, U2TP, Testautomatisierung, formale Verifikation

Die Softwareentwicklung wird seit Jahren von dem Umstand geprägt, dass Leistungsfähigkeit der Hardware und Komplexität der Programme einem exponentiellen Wachstum unterliegen, während die *Methoden* der Softwareentwicklung nur langsam voranschreiten. Die Codeerzeugung geschieht in den meisten Fällen nach wie vor manuell und weit verbreitete Programmiersprachen wie C oder C++ blicken auf eine 35- bzw. knapp 25-jährige Tradition zurück¹.

Vor allem in der eher konservativ geprägten Domäne der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik erweist sich die Einführung neuer Methoden oft als schwierig, was aus mehreren Gründen nachvollziehbar ist. Zum einen trägt die zu entwickelnde Software Sicherheitsverantwortung. Daher verbieten sich Techniken wie beispielsweise dynamische Speicherallokation / Objekterzeugung, Polymorphismus oder Multithreading, die in anderen Bereichen in den vergangenen Jahren weite Verbreitung fanden.

Zum anderen sind die Produktlebenszyklen extrem lang (z. T. mehrere Jahrzehnte), so dass sich sofort die Frage der Altsystempflege (sog. *Legacy Systems*) stellt. Um „methodischen Ballast“ zu vermeiden, werden nur wenige Neuerungen eingeführt, um die Zahl parallel verwendeter Entwicklungsverfahren überschaubar zu halten.

Und schließlich sind die Stückzahlen der später gefertigten Systeme vergleichsweise gering. Daraus ergibt sich ein signifikanter Anteil der Entwicklungskosten an den Produktkosten, was wiederum zu einer pessimistischen Bewertung von Risiken – wie beispielweise neuen Methoden – führt.

Heutige Entwicklungsprozesse der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnikdomäne weisen aber in vielen Punkten erhebliche Verbesserungspotentiale auf, so dass die Chancen-Risiken-Abwägung für moderne Methoden neu überdacht werden muss:

- Systemspezifikation, Systemarchitekturspezifikation und Schnittstellenbeschreibungen liegen informal als Klartextdokumente in Prosaform vor.
- Testfälle werden manuell abgeleitet, spezifiziert und ausgeführt. Die Dokumentation des Testaufbaus ist häufig unzureichend. Tests sind insgesamt schwer reproduzierbar und wiederverwendbar.
- Das Verhalten vieler Subsysteme und Module ließe sich gut auf (endliche) Zustandsmaschinen abbilden und würde so einer automatischen Codeerzeugung und formalen Verifikation zugänglich. Tatsächlich wird der Code aber manuell erstellt und getestet.

Die Notwendigkeit zur Umsetzung neuer Entwicklungsnormen wie der DIN EN 61508 (Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener Systeme) und der DIN EN 50126 ff. (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit von Bahnanwendungen) sowie die Wettbewerbsverschärfung

¹C wurde 1972 entwickelt und C++ 1983. Eine Standardisierung von C++ als ISO/IEC 14882 erfolgte jedoch erst 1998

durch die Einführung eines europaweit einheitlichen Zugsicherungssystems (ETCS: European Train Control System) erhöht den Druck auf die Hersteller, neue Konzepte in ihre Entwicklungsprozesse zu integrieren, um konkurrenzfähig zu bleiben.

Am Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung des DLR wurde daher unter Verwendung der Unified Modeling Language (UML) ein Vorgehen erarbeitet, mit dessen Hilfe sich eine vollständige Systementwicklung modellbasiert begleiten lässt.

Die Kernaspekte sind ein integriertes Anforderungs-, System- und Testmodell auf Basis der kürzlich verabschiedeten UML-Profile SysML (Systems Modeling Language, [1]) und U2TP (UML 2 Testing Profile, [2]), die modellinterne Verfolgbarkeit von Anforderungen auf die Implementierungs- und Testebene und die Möglichkeit zur Erzeugung von Code aus dem Modell [3]).

Die Leistungsfähigkeit des Konzeptes wurde anhand einer Fallstudie nachgewiesen, in der die Entwicklung einer Komponente des DLR-Eisenbahnsimulationslabors RailSiTe[®] UML-basiert nachvollzogen wurde. Dieser „Proof-of-Concept“ zeigt unter anderem, dass

- Anforderungs- und Umsetzungsbeziehungen durch alle Modellteile aufgebaut und skriptbasiert ausgewertet werden können.
- der aus dem UML-Modell erzeugte Code direkt auf einem eingebetteten System (Digitaler Signalprozessor) korrekt ausgeführt werden kann.
- die Testfallbeschreibung effektiv und übersichtlich ist und eine optimale Grundlage für eine Testautomatisierung darstellt [4].

Die Präsentation wird die Details des Konzeptes darstellen und auch einen Ausblick auf weiterführende Arbeiten geben. Das bezieht sich vor allem auf eine Testautomatisierung durch Überführung der UML-Testfallbeschreibungen in die Sprache TTCN-3 (Testing and Test Control Notation, Version 3, [5]) und eine formale Verifikation des Systemverhaltens durch Techniken wie Bounded Model Checking [6] oder SAT-checker.

Literatur

- [1] OBJECT MANAGEMENT GROUP: *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) Specification*. Mai 2006. Final Adopted Specification, <http://www.omg.org/cgi-bin/apps/doc?ptc/06-05-04.pdf>, Stand: 2006-08-01.
- [2] OBJECT MANAGEMENT GROUP: *UML Testing Profile*. Juli 2005. Version 1.0. <http://www.omg.org/cgi-bin/apps/doc?formal/05-07-07.pdf>, Stand: 2006-08-01.
- [3] KNOLLMANN, VOLKER und KARSTEN LEMMER: *Combined UML-based System- and Test Models as Backbone for the Development Process*. In: *6th Symposium on Formal Methods for Automation and Safety in Railway and Automotive Systems (FORMS/FORMAT)*, 2007. Angenommener Beitrag.
- [4] KNOLLMANN, VOLKER und KARSTEN LEMMER: *Graphische Testfallbeschreibung mit UML – Expertenwissen in Bildern?* In: *VDE-Kongress 2006 – Innovations for Europe*. VDE-Verlag, Oktober 2006.
- [5] SCHIEFERDECKER, INA, ZHEN RU DAI, JENS GRABOWSKI und AXEL RENNOCH: *The UML 2.0 Testing Profile and its Relation to TTCN-3*. In: HOGREFE, DIETER und ANTHONY WILES (Herausgeber): *TestCom*, Band 2644 der Reihe *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 79–94. Springer, 2003.
- [6] BIERE, ARMIN, ALESSANDRO CIMATT, EDMUND M. CLARKE, OFER STRICHMAN und YUNSHAN ZHU: *Bounded Model Checking*. In: ZELKOWITZ, MARVIN (Herausgeber): *Highly Dependable Software*, Band 58 der Reihe *Advances in Computers*. Academic Press, September 2003.

Ermittlung von optimalen Sollwerten für geschlossene Regelungssysteme unter Berücksichtigung unsicherer Prozesseinflüsse

Thomas Flemming

Fachgebiet Simulation und Optimale Prozesse
Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik
Technische Universität Ilmenau
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
Tel: +49 (0) 3677 69 - 1427
Fax: +49 (0) 3677 69 - 1415
Email: thomas.flemming@tu-ilmenau.de

Pu Li

Fachgebiet Simulation und Optimale Prozesse
Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik
Technische Universität Ilmenau
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
Tel: +49 (0) 3677 69 - 1423
Fax: +49 (0) 3677 69 - 1415
Email: pu.li@tu-ilmenau.de

Schlüsselwörter: robust, stochastisch, Sollwertoptimierung, Wahrscheinlichkeitsrestriktionen

Der wachsende Wettbewerbsdruck führt zu steigenden Anforderungen an den Betrieb industrieller Prozesse, vor allem hinsichtlich Flexibilität und Robustheit. Aufgrund der vielfältigen Änderung der Marktbedingungen ändern sich sowohl die Eigenschaften (z.B. Produktspezifikationen) als auch die Randbedingungen (z.B. Feedeigenschaften) eines Prozesses häufig, wobei die Amplitude und Frequenz dieser Änderungen, die signifikante Störungen der Prozesse darstellen, oftmals unsicher sind.

Daneben ist allgemein bekannt, dass es in der Prozessindustrie viele nicht direkt messbare Ausgangsvariablen gibt (z.B. Stoffkonzentrationen, Viskositäten), die folglich auch nicht mit in bestehende Regelkreise eingeschlossen sind. Sie stehen somit lediglich in einer open-loop-Beziehung zu den Störungen. Da diese Größen jedoch die Produktqualität repräsentieren und somit für den Betrieb sehr wichtig sind, müssen deren Werte eingehalten, d.h. innerhalb definierter Beschränkungen (Produktspezifikationen) gehalten werden.

In der Praxis werden häufig einfach messbare Größen (z.B. Temperaturen, Drücke) als Regelhilfsgrößen benutzt, um die nichtmessbaren Variablen zu regeln. Beim Design des Regelungssystems gilt es allerdings, die Unsicherheiten der Störungen richtig einzuschätzen. Eine Überschätzung der Unsicherheiten führt zu „konservativen“ Sollwerten für das Regelungssystem verbunden mit hohen Betriebskosten. Im Gegensatz dazu resultiert aus einer Unterschätzung der Unsicherheiten eine „aggressive“ (sehr optimistische) Sollwertfestlegung, in deren Folge die Produktspezifikationen sehr häufig verletzt werden.

Bei der Ermittlung geeigneter Sollwerte für derartige Regelungssysteme besteht die Herausforderung also darin, diese so festzulegen, dass unter dem Einfluss von bedeutenden unsicheren Störungen sowohl die geforderten Produktspezifikationen eingehalten als auch die Betriebskosten minimiert werden. Aufgrund der stochastischen Störungen kann dieses Problem mit den üblichen deterministischen Ansätzen nicht gelöst werden.

Im Rahmen eines DFG-Projektes wurde zur Lösung dieser Aufgabe ein stochastisches Optimierungskonzept für geschlossene Regelungssysteme entwickelt, dessen Kern die nichtlineare stochastische Optimierung unter Wahrscheinlichkeitsrestriktionen darstellt. Die Eigenschaft dieser Methode besteht darin, dass mit den ermittelten Sollwerten die Einhaltung der Prozessbeschränkungen (Produktspezifikationen) trotz der signifikanten Störungen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit garantiert werden kann, wobei das gewünschte Wahrscheinlichkeitsniveau (z.B. 95 %) vom Anwender individuell vorgegeben werden kann.

Dazu wird die Information über die stochastischen Eigenschaften der unsicheren Störungen in Form ihrer multivariaten Verteilungsdichtefunktion explizit mit in das Optimierungsproblem einbezogen, wobei insbesondere die Wirkung von normalverteilten Störungen mit stationärem Charakter betrachtet wird. Die Ergebnisse dieser Methodik stellen somit robuste und zuverlässige sowie unter Betracht der einbezogenen Unsicherheiten zugleich ökonomisch optimale Lösungen dar, die dem Regelungssystem als Führungsgrößen vorgegeben werden können.

Die Lösung des nichtlinearen stochastischen Optimierungsproblems erfolgt mit Hilfe eines sequentiellen Optimierungsschemas. Als Grundlage hierfür dient ein in [2] entwickelter Ansatz für nichtlineare Systeme, wobei dort lediglich open-loop-Systeme mit einer beschränkten Ausgangsvariablen betrachtet wurden. In der aktuellen Arbeit wurde dieser Ansatz auf Systeme in geschlossener Form erweitert. Dabei wurden neben den Beschränkungen der Ausgangsgrößen außerdem die Stellgrößenbeschränkungen als Wahrscheinlichkeitsrestriktionen formuliert, da diese Größen bedingt durch den geschlossenen Regelkreis ebenfalls stochastischer Natur sind. Weiterhin wurden auch Systeme mit mehreren beschränkten Ausgangsgrößen untersucht. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, in der Optimierungsaufgabe entweder separate oder simultane Wahrscheinlichkeitsrestriktionen zu definieren. Erstere beziehen sich auf die Einhaltung der einzelnen Restriktionsgrößen getrennt voneinander, während im simultanen Fall die gleichzeitige Einhaltung aller Größen mit der vordefinierten Wahrscheinlichkeit gefordert wird.

Im Vortrag werden das entwickelte Optimierungskonzept vorgestellt und die Ergebnisse der erfolgreichen Anwendung auf eine kontinuierlich betriebene Destillationskolonne präsentiert, wodurch die Anwendungsrelevanz des Konzeptes verdeutlicht wird. Die Aufgabe hierbei bestand darin, sowohl für die Temperaturregelung im Sumpf der Kolonne als auch für die Verhältnisregelung am Kopf der Kolonne die Sollwerte derart zu bestimmen, dass die für den Destillationsprozess aufzuwendende Heizenergie minimal wird. Es wird gezeigt, dass unter Berücksichtigung der unsicheren Eigenschaften des zufließenden Stoffgemisches (Feed) mit den ermittelten (optimalen) Sollwerten die Produktspezifikationen mit der gewünschten Wahrscheinlichkeit eingehalten werden. Ebenfalls wird auf die unterschiedliche Wirkung der beiden Restriktionsformen (separat und simultan) eingegangen.

Durch den direkten Vergleich mit einer konventionellen deterministischen Optimierungsstrategie, wobei die stochastischen Größen in Form ihrer Erwartungswerte einbezogen wurden, wird die Zuverlässigkeit und Robustheit des stochastischen Ansatzes aufgezeigt.

Literatur:

- [1] Li, P.: Prozessoptimierung unter Unsicherheiten. Habilitationsschrift, Fakultät für Prozesswissenschaften, TU Berlin, 2005.
- [2] Wendt, M.; Li, P.; Wozny, G.: Nonlinear Chance Constrained Process Optimization under Uncertainty. in: Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol.41, S. 3621-3629, 2002.

Modellbasierte Fehlererkennung und Fehlerdiagnose für große zyklische ereignisdiskrete Systeme

Matthias Roth, Stéphane Klein und Lothar Litz
Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Technische Universität Kaiserslautern
Postfach 3049 – 67653 Kaiserslautern
{mroth, sklein, litz}@eit.uni-kl.de

Modellbasierte Verfahren sind ein weittragender Ansatz zur Diagnose dynamischer Systeme. Speziell für große ereignisdiskrete Systeme wie automatisierte Produktionsanlagen stellt jedoch die Gewinnung geeigneter Modelle eine große Herausforderung dar. Bei der Erstellung eines modellbasierten Diagnosesystems erfordert die manuelle Konstruktion entsprechender Modelle eine tiefe Systemkenntnis und ein hohes Abstraktionsvermögen. Daher liefert die Entwicklung generischer Methoden einen wichtigen Beitrag, um die modellbasierte Diagnose großer Systeme einer breiten Anwendung zuzuführen.

Für zyklische ereignisdiskrete Systeme mit der in Abbildung 1 gezeigten Struktur wird ein Verfahren angegeben, das die Identifikation eines zur Fehlererkennung geeigneten Gesamtmodells des regulären Systemverhaltens ermöglicht. Die betrachteten Systeme bestehen aus der Kopplung einer Steuerung, deren Verhalten als deterministisch angesehen werden kann, mit einem nicht-deterministischen Prozess. Von außen betrachtet ist das so entstehende System ein nicht-deterministischer Ereignisgenerator.

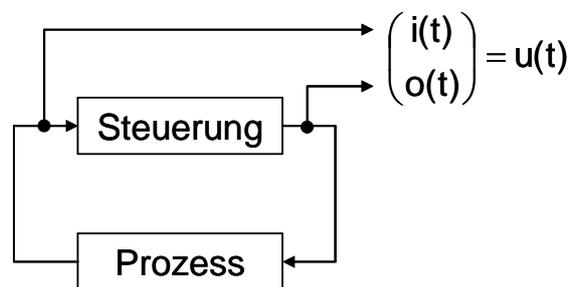


Abbildung 1: Struktur der betrachteten Systeme

Das Identifikationsverfahren basiert auf der dazu definierten Klasse der nicht deterministischen autonomen Automaten mit Ausgabefunktion (NDAAO). Anhand der Daten fehlerfreier Prozesszyklen wird ein NDAAO erstellt, der das nominale Ein- Ausgangsverhalten des Systems wiedergibt. Ein Parameter k erlaubt es E/A-Vektoren bei der Identifikation anhand ihrer letzten k Vorgänger zu unterscheiden. Durch Wahl eines geeigneten Wertes k ist es möglich einen Kompromiss zwischen Modellkomplexität und Modellgenauigkeit einzustellen. Es werden Metriken angegeben, die bei der Wahl des Faktors k berücksichtigt werden müssen und so zu einer Objektivierung bei der Parameterbestimmung führen.

Der identifizierte NDAAO wird zur Fehlererkennung eingesetzt indem er parallel zum beobachteten System geschaltet wird. Ein beobachtetes Systemverhalten wird als fehlerhaft deklariert, wenn es nicht mit dem Automaten erzeugt werden kann. Mit Hilfe des NDAAO ist es möglich Zustandsfehler zuverlässig zu erkennen. Durch das Bilden geeigneter Residuen aus fehlerhaftem Datenvektor und bestimmten Ausgangsdaten des NDAAO können Fehler, die zu direkt beobachtbaren Ereignissen führen, gut lokalisiert werden. Solche Fehler sind beispielsweise Sensordefekte, die sofort zu einer Änderung des vom Sensor zurückgegebenen Wertes führen.

Zur Lokalisierung von Fehlern, die zu nicht direkt beobachtbaren Ereignissen führen, und zum Erstellen von Diagnoseinformationen muss Wissen über physikalische Wirkungszusammenhänge zwischen den Sensoren und Aktuatoren einfließen. Es wird eine Methode vorgestellt, die das fehlerfreie Verhalten solcher Zusammenhänge mit zeitbehafteten Patterns beschreibt und diese generisch um ihr Verhalten im Fehlerfall erweitert. Für Standardkomponenten wie z.B. Zylinder mit Endschaltern wurde eine Patternbibliothek entworfen. Patterns von Wirkungszusammenhängen, die nicht in der Bibliothek enthalten sind, können mit einem geeigneten Verfahren identifiziert werden. Von den erweiterten Patterns ausgehend können systematisch Informationen zur Lokalisierung und Diagnose gewonnen werden.

Die kombinierte Anwendung von NDAAO zur Fehlererkennung und Patterns zur Diagnose erlaubt es Zustands- und Zeitfehler im Prozess zu erkennen und zu diagnostizieren. Durch das automatische Erstellen des NDAAO gelingt es einerseits, ohne tiefe Systemkenntnis eine Vielzahl von Fehler zu detektieren und zu lokalisieren. Andererseits erlauben es die Patterns leicht zugängliches Systemwissen über Wirkungszusammenhänge gezielt einzusetzen und damit die Diagnoseinformationen im Fehlerfall zu erweitern.

Die entworfene Methode wurde erfolgreich auf eine Vliesproduktionsanlage mit 336 binären SPS-Ein- und Ausgängen angewendet. Die Ergebnisse werden vorgestellt.

Rekonfiguration von Regelkreisen nach Aktorausfällen

Jan H. Richter *

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

Jan Lunze **

** 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: Rekonfiguration, virtueller Aktor, fehlertolerante Steuerung

In diesem Vortrag wird eine Methodik zur Rekonfiguration von Regelkreisen nach Aktorfehlern vorgestellt. Fällt ein Aktor aus, der Bestandteil eines Regelkreises ist, so ist der Kreis unterbrochen und ohne Ausnutzung vorhandener Redundanz außer Funktion. Um die Funktionalität des Kreises wieder herzustellen, sind nach der Diagnose des Fehlers Maßnahmen zur Restrukturierung des Regelkreises erforderlich, die über eine Anpassung der inneren Struktur des Reglers und seiner Parameter hinausgehen. Der Regler muss auf alternative Stellgrößen zugreifen, damit ein geschlossener Kreis entsteht (Abbildung 1). Diese Vorgänge müssen ohne Eingriff eines Anlagenoperators und während der Laufzeit des Prozesses ablaufen.

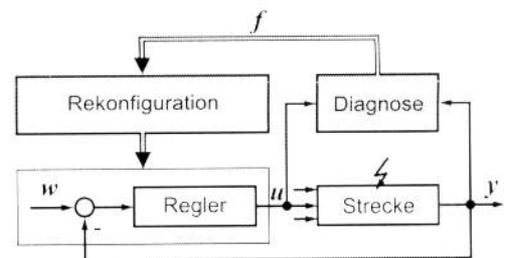


Abbildung 1: Rekonfigurationsproblem

Die hier verfolgte Rekonfigurationsmethode basiert auf der Idee, den Fehler vor dem Regler zu „verstecken“. Der Entwurf des nominellen Reglers ist ein iterativer Prozess, der zu einem Kompromiss führt, und für den im Fehlerfall nicht genügend Zeit zur Verfügung steht. Der nominelle Regler soll daher im Kreis verbleiben. Dazu wird zwischen die Strecke mit Aktorfehler und den Regler ein Rekonfigurationsblock geschaltet, wie in Abbildung 2 gezeigt. Hierdurch treten die Signale u und y zweimal auf: Einmal aus Sicht der fehlerhaften Strecke (u_f/y_f), zum anderen aus Reglersicht (u_c/y_c). Erstere Signale wirken tatsächlich an der Strecke, letztere Signale sind für den Regler sichtbar bzw. werden von ihm generiert. Der nominelle Regler kann im Kreis verbleiben, sofern sich die rekonfigurierte Strecke bestehend aus Rekonfigurationsblock und fehlerhafter Strecke wie die fehlerfreie Strecke verhält (Abbildung 2) [1]. Aus Sicht der Implementierung besteht der rekonfigurierte Regler aus dem nominellen Regler und dem Rekonfigurationsblock.

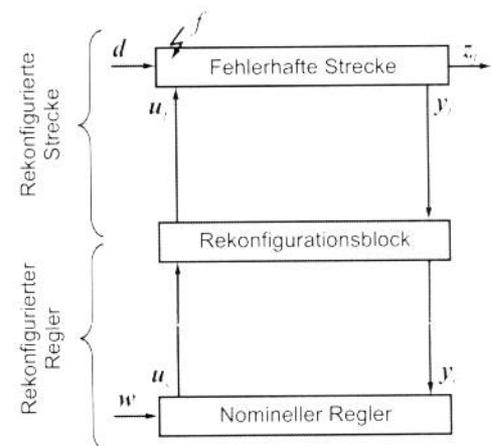


Abbildung 2: Fehlerverdeckung

Außer dem Ziel der Fehlerverdeckung werden folgende Forderungen an den geschlossenen Kreis gestellt. Der rekonfigurierte Regelkreis soll intern stabil sein. Des Weiteren soll der

Bewertungsausgang z_f bei gleichem Anfangszustand $x(0)$ unter der Anregung $u_c(t)$ den gleichen Endwert wie im nominellen Fall erreichen, $z_f(t \rightarrow \infty) - z(t \rightarrow \infty) = 0$ (Gleichgewichtsziel). Falls möglich, soll der er Bewertungsausgang z_f unter der Anregung $u_c(t)$ zu allen Zeiten dem nominellen Verhalten folgen, $\forall t: z_f(t) - z(t) = 0$ (Trajektorienziel). Zu diesen Zielen werden Bedingungen der Lösbarkeit angegeben [1,2].

Als universelle Methode zur Rekonfiguration nach Aktorausfällen wird im Vortrag das Konzept des virtuellen Aktors vorgestellt. Der virtuelle Aktor ist ein dynamisches System

$$\dot{x}_\Delta = A_\Delta x_\Delta + B_\Delta u_c, x_\Delta(0) = x_{\Delta 0}$$

$$u_f = Mx_\Delta + Nu_c$$

$$y_c = Cx_\Delta$$

mit $A_\Delta = A - B_f M$, $B_\Delta = B - B_f N$ (Abbildung 3). Seine Struktur hat offensichtliche Ähnlichkeiten mit einem Zustandsbeobachter und ist tatsächlich mathematisch dual zu diesem. Durch geeignete Festlegung der Matrizen M , N werden die drei angegebenen Ziele erreicht [1,2,3,4]. Der virtuelle Aktor führt im Differenzzustand x_Δ die Abweichung des Verhaltens der fehlerhaften gegenüber der fehlerfreien Strecke nach und korrigiert die Stellwerte u_c anhand der Vorwärtsverstärkung N und der Rückführung M .

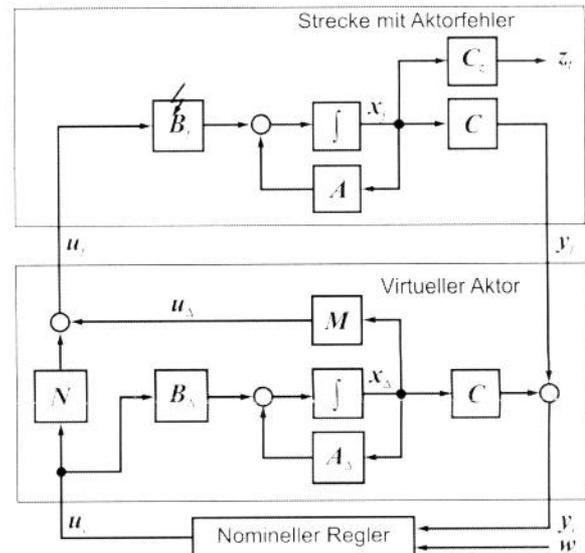


Abbildung 3: Virtueller Aktor

In diesem Vortrag werden Methoden zum Entwurf der Verstärkungen M und N des virtuellen Aktors vorgestellt, die es erlauben, die genannten Ziele zu erreichen. Es wird darauf eingegangen, unter welchen Bedingungen ausschließlich der statische Block N bzw. der vollständige virtuelle Aktor verwendet werden müssen. Des Weiteren wird die experimentelle Erprobung des virtuellen Aktors an einem verfahrenstechnischen Prozess bestehend aus der Füllstands-, Temperatur- und Leitfähigkeitsregelung eines kontinuierlich durchflossenen Reaktors gezeigt.

Literatur:

- [1] T. Steffen: *Control Reconfiguration of Dynamical Systems: Linear Approaches and Structural Tests*. LNCIS-Serie, Springer-Verlag, Heidelberg, 2005
- [2] J. Lunze, T. Steffen: Rekonfiguration linearer Systeme bei Aktor- und Sensorfehlern. *Automatisierungstechnik*, 51(2):60-68, 2003
- [3] J. Lunze, T. Steffen: Control reconfiguration after actuator failures using disturbance decoupling methods. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(10): 1590-1601, October 2006
- [4] J. Lunze, J. H. Richter: Entwurfsmethode für den verallgemeinerten virtuellen Aktor zur Rekonfiguration von Regelkreisen. *Automatisierungstechnik*, 54(7):353-361, Juli 2006

Lokale Neuro-Fuzzy-Netze für Mikrocontroller in Festkomma-Arithmetik

Dipl.-Ing. Oliver Bänfer

Institut für Mechanik und
Regelungstechnik - Mechatronik
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Straße 9-11
57068 Siegen
Tel.: +49 (0) 271 740 - 2492
Fax: +49 (0) 271 740 - 2365
Email: oliver.baenfer@uni-siegen.de

Prof. Dr.-Ing. Oliver Nelles

Institut für Mechanik und
Regelungstechnik - Mechatronik
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Straße 9-11
57068 Siegen
Tel.: +49 (0) 271 740 - 4045
Fax: +49 (0) 271 740 - 2365
Email: oliver.nelles@uni-siegen.de

Schlüsselwörter: LOLIMOT, Neuronales Netz, Kennfeld, Saugrohrmodell

Bedingt durch die zunehmende Anzahl von Freiheitsgraden heutiger Verbrennungsmotoren in Kraftfahrzeugen steigt der Umfang und die Komplexität der für die Motorsteuerung durchzuführenden Modellierungsaufgaben erheblich an. Zur Parametrierung dieser Modelle ist eine Vielzahl von Konstanten, Kennlinien und Kennfeldern erforderlich, was einen erheblichen Bedarf an Steuergeräteressourcen nach sich zieht.

Manche dieser Modelle erfordern die Abbildung hochdimensionaler Abhängigkeiten einer Ausgangsgröße von mehreren Eingangsgrößen. Die Repräsentation einer solchen Funktion durch Kennfelder mit Stützstellen auf einem Gitter ist die übliche Vorgehensweise. Da hierbei die Anzahl der erforderlichen Stützstellen exponentiell mit der Anzahl der Eingangsgrößen anwächst („Fluch der Dimensionalität“), ist dieses Vorgehen ab einer gewissen Anzahl von Eingangsgrößen nicht mehr praktikabel.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma bieten neuronale Netze, da bei diesen die Anzahl der Kalibrationsgrößen nicht im selben Maße mit der Anzahl der Eingangsgrößen ansteigt. Allen neuronalen Netzen ist gemeinsam, dass in deren Neuronen eine nichtlineare Funktion (Aktivierungsfunktion bzw. Gültigkeitsfunktion) berechnet werden muss. Die Berechnung der dafür nötigen Exponentialfunktion ist jedoch numerisch sehr aufwendig. Dies gilt besonders bei Verwendung von Festkomma-Arithmetik, wie es in preiswerten Motorsteuergeräten üblich ist. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Funktionen je nach Einsatzgebiet des neuronalen Netzes sehr oft berechnet werden müssen, wodurch eine möglichst ressourcenschonende Berechnungsmethode von großer Bedeutung ist.

Die Realisierung eines neuronalen Netzes in ressourcenschonender Festkomma-Arithmetik soll am Beispiel der Modellierung des Luftmassenstroms (*Bild 1*) untersucht werden. Für die Einhaltung anspruchsvoller Emissionsgrenzwerte muss die Motorsteuerung eine genaue Modellierung des Luftmassenstroms in Abhängigkeit vom Betriebszustand des Motors gewährleisten. Dies ermöglicht es, die einzuspritzende Kraftstoffmenge so zu bemessen, dass ein für die Abgasnachbehandlung im Katalysator optimales Luft-Kraftstoffverhältnis ($\lambda = 1$) vorliegt.

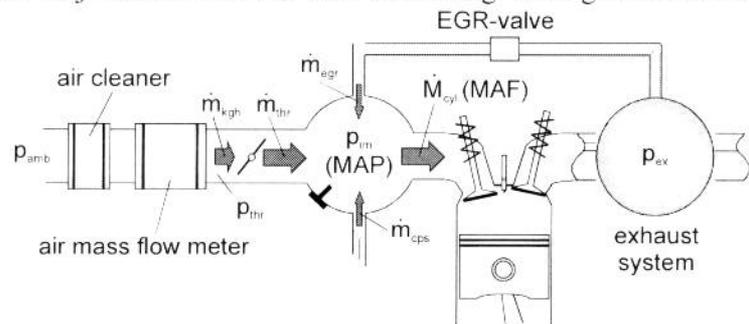


Bild 1: Saugrohrmodell

In der Motorsteuerung erfolgt heute die Beschreibung der Abhängigkeit des Luftmassenstroms MAF vom Saugrohrdruck MAP in einer linearisierten Form, der so genannten Schluckgeraden, die durch den Ordinatenabschnitt OFFSET und die Steigung SLOPE beschrieben wird (Bild 2). Diese beiden Parameter werden durch einen Satz von 48

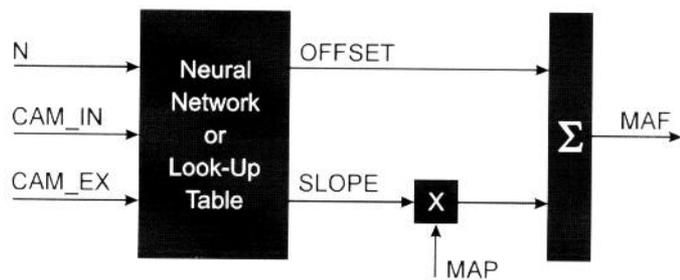


Bild 2: Signalfluss bei konstanter Aktorstellung

Kennfeldern in Abhängigkeit von Drehzahl N, Nockenwelleneinlassposition CAM_IN und -auslassposition CAM_EX sowie den Aktorstellungen für Drallklappe und Schaltsaugrohr im Steuergerät hinterlegt. Durch den Einsatz von lokalen Neuro-Fuzzy-Netzen ist es gelungen, alle 48 Kennfelder durch vier Netze vollständig zu ersetzen. Die Realisierung in Festkomma-Arithmetik auf einem Serienmotorsteuergerät zeigt eine deutliche Verringerung des benötigten KalibrationsSpeichers zu Lasten eines moderat höheren Rechenaufwands. Somit ist eine Möglichkeit geschaffen, den „Fluch der Dimensionalität“ für Kennfelder zu umgehen.

Kennfelder Standard Methode in Serien-ECU (Bild 3 links)	Lokale Neuro-Fuzzy Netze Moderne Methode realisiert in Serien-ECU (Bild 3 rechts)
– „Fluch der Dimensionalität“ – Saugrohrmodell kann <u>nicht</u> um zusätzlichen Eingang erweitert werden – Hoher Speicherbedarf erforderlich + Geringer Rechenaufwand nötig	+ <u>Kein</u> „Fluch der Dimensionalität“ + Saugrohrmodell kann um beliebige Eingänge erweitert werden + Geringer Speicherbedarf nötig – Hoher Rechenaufwand erforderlich

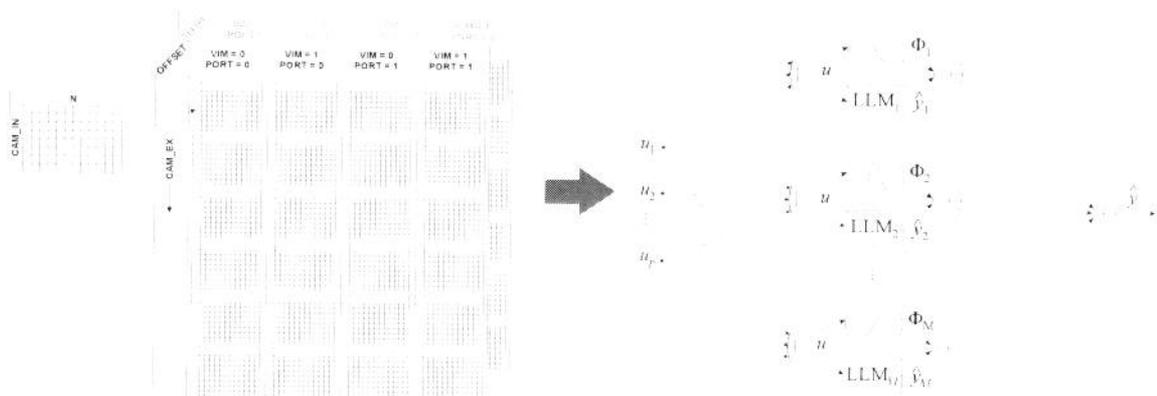


Bild 3: Methoden zur Modellierung des Luftmassenstroms

Literatur:

- [1] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1988.
- [2] Nelles, O. *Nonlinear System Identification*, Springer Verlag, Berlin, 2001.
- [3] van Basshuysen, R., Schäfer, F. *Handbuch Verbrennungsmotor*, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2005.
- [4] *Documentation Matlab Fixed-Point Toolbox*, The MathWorks, Inc., 2006.

Mobile Agenten für den Fernzugriff auf eingebettete Systeme

Dr.-Ing. Josef Renner

Prof. Dr.-Ing. Peter Protzel

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Professur für Prozessautomatisierung
Technische Universität Chemnitz
Reichenhainer-Str. 70
09107 Chemnitz
Tel.: 0371 531 33442
Fax.: 0371 531 24129

josef.renner@asamnet.de

protzel@etit.tu-chemnitz.de

Schlüsselwörter:

Agenten-Technologie, mobiler Agent, Teleautomation, Fernzugriff, Online-Verbindung, Web-Technologien, Java in eingebetteten Systemen, Agenten-Plattform, Ein-Agenten-System, Fernzugriff-Agent für Anwendungen in der Automatisierungstechnik

In der Automatisierungstechnik sind Fernzugriffe auf Geräte und Anlagen bereits heute eine wesentliche Anwendung der Teleautomation. Für die Bereiche Fernleiten und Ferninstandhalten kommen dabei Teleservice-Systeme unter Nutzung analoger oder digitaler Wählleitungen oder in letzter Zeit auch Web-Verbindungen zum Einsatz. Diesen konventionellen Systemen gemeinsam ist die erforderliche Online-Verbindung zum Zielsystem mit einigen gewichtigen Nachteilen:

- Notwendige Verfügbarkeit des Nutzers über die gesamte Servicezeit notwendig
- Übertragungsstörungen
- Hohe Leitungskosten auf Grund der Netzwerklast
- Niedrige Übertragungsraten begrenzen synchrone Kopplung zum fernen Prozess
- Herstellerspezifische Systeme
- Echtzeitgerechte Anbindung an den Remote-Prozess oftmals nicht möglich

Die grundlegenden Forschungsarbeiten zur Technologie der Software-Agenten und speziell der mobilen Agenten wurden in den vergangenen beiden Jahrzehnten durchgeführt und können heute als abgeschlossen betrachtet werden. Viele der zu dieser Zeit vorgeschlagenen Anwendungen waren aufgrund der nicht vorhandenen Netzwerk-Infrastruktur und der noch geringen Leistungsfähigkeit der Rechnersysteme nicht realisierbar. Mobile Agenten, die ebenfalls zu den Web-Technologien zu zählen sind, können zukünftig die Technologie der Fernzugriffe innerhalb der Automatisierungstechnik deutlich verbessern und die genannten Nachteile von Online-Verbindungen überwinden.

Ein sehr großer Teil der Automatisierungsgeräte und Systeme ist den eingebetteten Systemen zuzurechnen. Die Realisierung der Agenten-Fähigkeit für derartige Systeme, d.h. die Anbindung an ein Netzwerk und die Integration einer Agenten-Plattform, wird in diesem Vortrag behandelt. Es wird ein Agenten-System für den Fernzugriff anhand der Anforderungen für die Automatisierungstechnik vorgestellt und dessen Entwurf, die Entwicklung und eine Testmöglichkeit erläutert. Ein derartiges System besteht aus der

Benutzer-Schnittstelle, einem Agenten-Portal und entsprechend ausgerüsteten Zielsystemen. Im Gegensatz zu dem in der Fachliteratur beschriebenen Einsatz von Multi-Agenten-Systemen vorwiegend im Bereich von E-Commerce genügt hier im ersten Ansatz ein Ein-Agenten-System.

Als Programmiersprache des Agenten wird Java mit einer Java Virtual Machine als Ausführungsumgebung als am besten geeignet befunden, nicht zuletzt wegen der umfangreichen Entwicklungsunterstützung und der ständigen Weiterentwicklung dieser Sprache. Eine Schwierigkeit besteht darin, für ein bestimmtes eingebettetes System eine passende Java Virtual Machine (JVM) zur Verfügung zu haben. Praktische Anwendungen erfordern in der Regel die Portierung einer vorhandenen JVM. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit [4] wurde die Kertasarie-JVM [3] ausgewählt und für einen 16-Bit-Mikrocontroller unter einem Echtzeit-Betriebssystem portiert.

Abschließend soll auf vier mögliche Anwendungsbereiche eines Fernzugriff-Agenten für die Automatisierungstechnik näher eingegangen werden:

- *Datalogging*, d.h. die Sammlung (monitoring), Auswertung (evaluation) und Rückmeldung (notification) von Prozessdaten durch einen sog. Datalogging-Agenten.
- *Autonomer Zustandsabgleich*, d.h. Datenabgleich im Zielsystem auch unter Einbeziehung weiterer Remote-Systeme bis hin zur Agenten-basierten Prozess-Regelung.
- *Fernsteuerung von Geräten und Anlagen*, d.h. der mobile Agent greift vor Ort aktiv in den Prozess-Ablauf ein, z.B. durch die Einbringung von ereignis- und/oder zeitgesteuerten Schrittketten in die Prozess-Bedienung.
- *Informationsverbreitung an Zielsysteme (information dissemination)*
Die Hochrüstbarkeit für Software ist für die neuen Generationen von Automatisierungsgeräten in der Regel prinzipiell gegeben. Dies ist heute aber eine Aufgabe vor Ort, die aufgrund des großen Feldbestandes mit unterschiedlichen Softwareständen zukünftig immer schwieriger zu bewältigen sein wird. Mobile Agenten könnten diese Aufgabe übernehmen, indem sie nicht nur Nachrichten zustellen, sondern auch den Transfer und die Installation von neuer Software oder Firmware durchführen.

Literatur:

- [1] D. Lange, M. Oshima: Seven Good Reasons for Mobile Agents. Communications of the ACM, Vol. 42, No. 3. 1999.
- [2] J. Renner, P. Protzel, C. Hochberger, S. Gatzka: Neue Perspektiven für die Teleautomation durch mobile Software-Agenten auf eingebetteten Systemen. In: Kongress Embedded World (2003), S. 611-622.
- [3] Kertasarie-VM: Java Virtual Machine. Technische Universität Dresden, Institut für Technische Informatik, Professur für Mikrorechner.
URLs <http://www.mr.inf.tu-dresden.de> , <http://www.kertasarie.de>
- [4] J. Renner: Mobile Agenten für den Fernzugriff auf eingebettete Systeme. Dissertation, TU Chemnitz, 2006.
Als pdf-file verfügbar unter <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2006/0109>

Aspects of Optimal Hybrid Control

Sid Ahmed Attia^{1,2} and Vadim Azhmyakov¹

¹ Fachgebiet Regelungssysteme, Sekr. EN11, Technische Universität Berlin,
Einsteinufer 17, 10587 Berlin

² Systems and Control Theory Group, MPI für Dynamik komplexer technischer Systeme,
Sandtorstr. 1, 39106 Magdeburg

e-mail: attia@control.tu-berlin.de, azhmyakov@control.tu-berlin.de

Abstract

Hybrid systems have been extensively studied in the past decade, both in theory and practice. In particular, driven by engineering requirements, there has been increasing interest in *optimal* control of hybrid systems (e.g. [1, 2, 3, 4, 5]).

We are currently investigating two specific optimal hybrid control problems. The first class of problems to be discussed in this presentation concerns hybrid systems where discrete transitions are being triggered by the continuous dynamics and are accompanied by discontinuous changes in the real-valued part of the state variable (“jumps”). The control objective is to minimize a cost functional, where the control parameters are the state jumps. This class captures phenomena arising, e.g., in cyclically operated batch processes and certain epidemic propagation models. We discuss some necessary conditions of optimality and cast the problem as a nonlinear programming problem for which gradient formulas are derived [7].

The second class of optimality problems to be discussed concerns hybrid systems with internally forced switchings *and* continuous control input signals. Using operator theoretic techniques and Lagrange functions, a general gradient formula can be derived. This leads to a more tractable problem, and gradient-descent methods can be used for constructing a desired control profile [8].

Further work concerns the derivation of algorithms based on a newly elaborated version of Pontryagin-like necessary conditions for optimality.

References

- [1] P. Caines and M.S. Shaikh, Optimality zone algorithms for hybrid systems computation and control: From exponential to linear complexity, in: *Proc. 13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Limassol, 2005, pp. 1292-1297.
- [2] C. Cassandras, D.L. Pepyne and Y. Wardi, Optimal control of a class of hybrid systems, *IEEE Trans. Automat. Contr.* **46** (2001) pp. 398-415.

- [3] M. Garavello and B. Piccoli, Hybrid necessary principle, *SIAM J. Control Optim.*, **43** (2005), pp. 1867-1887.
- [4] B. Piccoli, Necessary conditions for hybrid optimization, in: *Proc. 38th CDC*, Phoenix, 1999, pp. 410-415.
- [5] H.J. Sussmann, A maximum principle for hybrid optimization, in *Proc. 38th CDC*, pp.425-430, Phoenix, USA, 1999.
- [6] S.A. Attia, M. Alamir and C. Canudas de Wit, Suboptimal control of switched non-linear systems under location and switching constraints, in *Proc. 16th IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, 2005.
- [7] S.A. Attia, V. Azhmyakov and J. Raisch, State jump optimization for a class of hybrid autonomous systems, submitted to *2007 ACC*.
- [8] V. Azhmyakov and J. Raisch, A gradient-based approach to a class of hybrid optimal control problems, in *Proc. 2nd IFAC Conf. Analysis and Design of Hybrid Systems*, pp.89-94, Alghero, Italy, 2006.

Flachheitsbasierte Steuerungs- und Regelungsstrategien für Wärme- und Stoffübertragungsprozesse

Alexander Kharitonov und Oliver Sawodny

Institut für Systemdynamik

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

Tel. +49 711 685 66293/66303

Fax +49 711 685 66371

Email: {Alexander.Kharitonov, Oliver.Sawodny}@isys.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Flachheit, Systeme mit verteilten Parametern, Wärme- und Stoffübertragungsprozesse

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass die Wärme- und Stoffübertragungsprozesse, die den Systemen mit verteilten Parametern (SVP) und verteiltem Eingriff entsprechen, als flache Systeme betrachtet werden können [4], [5]. Aufbauend darauf werden flachheitsbasierte Regelungs- und Steuerungsentwurfsmethoden mittels des Potenzreihenansatzes (siehe etwa [1], [2], [3]) hierfür entwickelt. Im Gegensatz zu SVP mit Randeingriff kann die an einem der Ränder definierte Ausgangsgröße allein alle Systemgrößen differentiell nicht parametrisieren bzw. ist kein flacher Ausgang des Systems. Dies ist dadurch bedingt, dass ein SVP mit verteiltem Eingriff neben einem einstellbaren Eingang (in diesem Fall ist es die dem verteiltem Eingriff entsprechende Stellgröße) auch nichteinstellbare Eingänge bzw. als Störgrößen auftretende Randeingriffe besitzen kann. Da die Gesamtanzahl der Eingänge größer als die Anzahl der Ausgänge ist, nimmt die parametrisierende Größe die Form eines Vektors an. Es wird gezeigt, dass der Vektor des flachen Ausganges aus zwei Komponenten besteht, die folgendermaßen gewählt werden können: die erste Komponente des flachen Ausganges ist die an einem der Ränder definierte Ausgangsgröße und parametrisiert einen Teil der Systemdynamik, die unmittelbar für die Führungsgrößenaufschaltung (Vorsteuerung) verwendet wird; die zweite Komponente des flachen Ausganges parametrisiert die Restdynamik des Systems, die den Einfluss des hier als Störung auftretenden Randeingriffs auf die Ausgangsgröße wiedergibt. Diese Komponente des flachen Ausganges ist eine nichtmessbare Rechengröße, die vorsteuernd geschätzt oder über einen Beobachter ermittelt werden kann. Die Beobachtbarkeit ist dabei dank der Flachheit stets gegeben. Die Berücksichtigung dieser durch den Schätzer oder Beobachter ermittelten Systemgröße in der Steuerungs- und Regelungsstrategie kann als eine Störgrößenaufschaltung interpretiert werden, die den Einfluss der Randeingriffe auf die Ausgangsgröße kompensiert. Das vorgeschlagene Steuer-/Regelgesetz hat die folgenden Eigenschaften:

- die Ausgangsgröße wird von den Randeingriffen approximativ entkoppelt;
- das ursprüngliche System wird in ein einfaches System mit konzentrierten Parametern (SKP) erster Ordnung hinsichtlich des Ein-/Ausgangsverhaltens approximativ transformiert.

Der Teil der Steuerungs- und Regelungsstrategie mit einem Schätzer/Beobachter wird als Entkopplungsanteil (der Rückführung) bezeichnet. Manche Wärme- und Stoffübertragungsprozesse weisen auch eine zeitveränderliche Geschwindigkeit des zu erwärmenden Mediums auf, deren Einfluss auf die Ausgangsgröße durch den Entwurf eines zeitvarianten Beobachters kompensiert wird. Die Entkopplung der Ausgangsgröße von den Randeingriffen bzw. die approximative Transformation des ursprünglichen Systems in ein SKP erster Ordnung öffnet

den Weg zum Entwurf eines überlagerten Reglers, der den Restfehler durch die approximative Entkopplung sowie Modellunsicherheiten kompensieren kann.

Literatur:

- [1] B. Laroche, Ph. Martin, P. Rouchon: Motion Planning for the Heat Equation. In *Journal of Robust and Nonlinear Control*, 10:629–643, 2000
- [2] A. F. Lynch, J. Rudolph: Flachheitsbasierte Randsteuerung parabolischer Systeme mit verteilten Parametern. In *at-Automatisierungstechnik*, 48(10):478–486, 2000
- [3] T. Meurer, M. Zeitz: Flachheitsbasierte Steuerung und Regelung eines Wärmeleitungssystems. In *at-Automatisierungstechnik*, 52(9):411–420, 2004
- [4] A. Kharitonov, O. Sawodny: Flatness–Based control feedforward control for parabolic distributed parameter systems with distributed control. In *International Journal of Control*, 79(7): 677–687, 2006
- [5] A. Kharitonov, O. Sawodny: Flatness–Based Disturbance Decoupling for Heat and Mass Transfer Processes with Distributed Control. In *Proc. of the IEEE Conference on Control Application*, Munich, 2006, Seiten 674–679

Port-Hamilton'sche Systeme für die Regelung nicht-linearer Systeme

Richard Stadlmayr *

Kurt Schlacher **

* Dynamics & Control

** Institut für Regelungstechnik und
Prozessautomatisierung

Linz Center of Mechatronics GmbH
Altenbergerstraße 69
A-4040 Linz, Österreich
++437322468-9733
++437322468-9734
richard.stadlmayr@lcm.at

Johannes Kepler Universität Linz
Altenbergerstraße 69
A-4040 Linz, Österreich
++437322468-9730
++437322468-9734
kurt.schlacher@jku.at

Schlüsselwörter: Port-Hamilton'sche Systeme, Folgeregelung, Mechatronik;

Für die Beschreibung der Dynamik von mechanischen Systemen sind Hamilton-Systeme ein fixer Bestandteil. Eine konsequente Verallgemeinerung der Hamilton-Systeme führt zur Klasse der Port-Hamilton'schen Systeme mit Dissipation, bzw. PCHD-Systeme, oder kürzer PH-Systeme. Oftmals verlangt man, dass die Strukturmatrix der PH-Systeme die Integrabilitätsbedingungen einer Possion-Struktur erfüllt. Auf Grund der mathematischen Struktur lassen physikalische PH-Systeme eine anschauliche Interpretation der Energieflüsse zu und eignen sich gut für den Entwurf einer nicht-linearen Regelung zur Stabilisierung einer Gleichgewichtslage. Das Entwurfsverfahren Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control, kurz IDA-PBC, nutzt die Passivität der PH-Struktur aus, und es wird begleitend zum Reglerentwurf eine Energiefunktion berechnet, mit der die Stabilität im Sinne von Lyapunov gezeigt werden kann.

Im Rahmen des Vortrages wird der IDA-PBC-Zugang für die Kombination einer Steuerung mit einer Zustandsregelung zum Entwurf einer Trajektorien-Folgeregelung gezeigt. Eine Steuerfunktion lässt sich beispielsweise mit flachheits-basierten Methoden systematisch berechnen, und sie ist beim Entwurf der Folgeregelung zu berücksichtigen. Das Einführen des Folgefehlers $e=x-x_{des}(t)$ entspricht einem Spezialfall einer zeitvarianten Zustandstransformation, die im Allgemeinen nicht strukturerhaltend ist. Existiert die Lösung einer PDE, so lässt sich durch eine Modifikation der Hamilton'schen Funktion die Trajektorie in einer zeitvarianten Beschreibung berücksichtigen. Eine differentialgeometrische Betrachtung von PH-Systemen erlaubt dann eine systematische Untersuchung von nicht-linearen zeitvarianten Systemen. Die vorgestellte Theorie soll anhand der schwebenden Kugel gezeigt werden.

Literatur:

- [1] A. van der Schaft (2000): L_2 -Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control, Springer Verlag, London, GB.
- [2] D.J. Saunders (1989): The Geometry of Jet Bundles, Cambridge University Press, Melbourne, Aus.
- [3] H. Khalil (2002): Nonlinear Systems, 3rded., Prentice Hall, New Jersey, US.

Kognitive technische Systeme: Automatisierungstechnische Beispiele zur lernfähigen 'Regelung' und zur Bedienerüberwachung

Elmar Ahle*

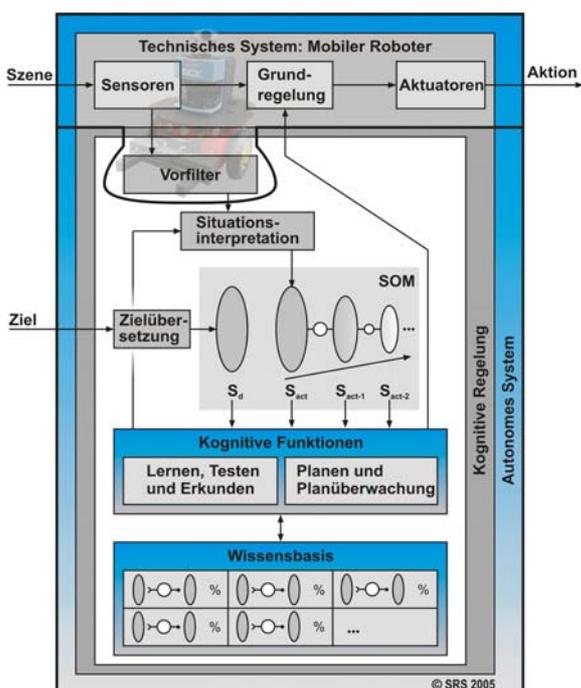
Dirk Söffker**

*Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik
Universität Duisburg-Essen
47048 Duisburg
Tel.: 0203 379 3022
Fax: 0203 379 3027
Email: elmar.ahle@uni-due.de

**Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik
Universität Duisburg-Essen
47048 Duisburg
Tel.: 0203 379 3429
Fax: 0203 379 3027
Email: soeffker@uni-due.de

Schlüsselwörter: Kognitive technische Systeme, autonome Systeme, mobiler Roboter, Überwachungsautomat, Mensch-Maschine-Interaktion

Die Realisierung kognitiver technischer Systeme wird in diesem Beitrag an zwei konkreten technischen Beispielen aufgezeigt. Zum Einen wird am experimentellen Beispiel eines lernfähigen mobilen Roboters die situative Interaktion mit unbekanntem Umgebungen gezeigt, zum Anderen wird die Konzeption eines Überwachungsautomaten für menschliche Bediener technischer Systeme als Beispiel zum Entwurf für Überwachungssysteme zur Interaktion mit komplexen Automatisierungssystemen vorgestellt. Kognitive Systeme (biologische sowie auch technische) sind nach [6] dadurch gekennzeichnet, dass sie in eine Umgebung eingebunden sind, flexibel und situationsadaptiv handeln und sich durch Lernfähigkeit und Antizipation auszeichnen. Um dieses zu realisieren, benötigen kognitive technische Systeme eine Repräsentationsebene. Im vorliegenden Beitrag wird hierzu ein detailliertes Situation-Operator Modell [5], welches zur Modellbildung der Mensch-Maschine-Interaktion entwickelt wurde, als Grundlage der Automatenkonzeption verwendet.



In Abbildung 1 ist die kognitive Architektur des autonomen Systems schematisch dargestellt. Die Signale der Sensoren des technischen Systems werden vorgefiltert und Merkmale zur Situationsbeschreibung extrahiert. Die Interpretation der Situation wird durch die kognitiven Funktionen angepasst, wie es aus der Modellierung der menschlichen Kognition bekannt ist [4]. Die in der Wissensbasis gespeicherten Erfahrungen werden genutzt, um eine Operatorsequenz zu planen, welche die aktuelle Situation in die vorgegebene Zielsituation überführt. Die geplante Operatorsequenz wird an das technische System gesandt und überwacht ausgeführt. Ein mentales Modell der Umwelt wird durch Interaktion mit der Umgebung gelernt und in der Wissensbasis gespeichert. Eine detaillierte Beschreibung der System-

Abbildung 1: Kognitive Architektur des autonomen Systems

architektur ist in [2] gegeben. Die entwickelte kognitive Regelung kann auf verschiedene technische Systeme angewandt werden. Als Anwendungsbeispiel ist ein mobiler Roboter gewählt worden [1] und in diesem Beitrag wird die konkrete Realisierung der Architektur beschrieben. Die erfolgreiche Validierung der einzelnen Module der kognitiven Architektur in einer Laborumgebung wird im Beitrag ausführlich gezeigt.

Das Situations-Operator-Modell wird in [3] zur systematischen Strukturierung allgemein der Modellbildung der Fahrzeug-Umwelt Gesamtsituation und somit auch des Überholvorganges benutzt. Dieser systematische, modulare und ganzheitliche Ansatz soll sicherstellen, dass die

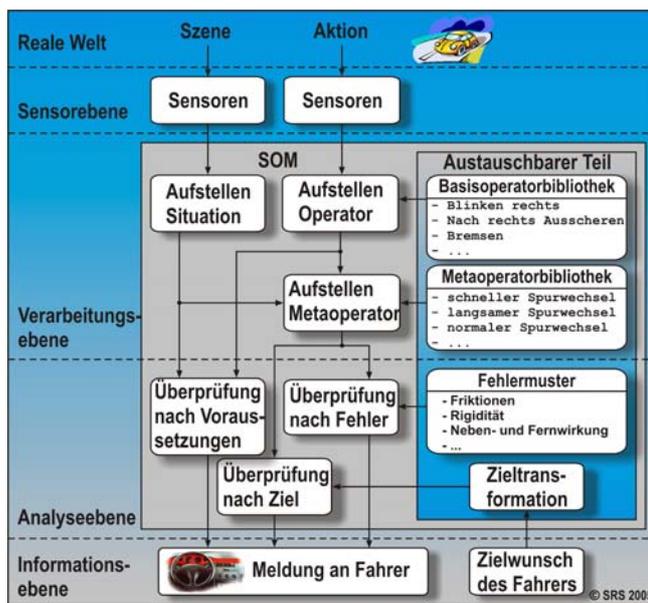


Abbildung 2: Konzeption des Überwachungsautomaten

Gesamtkonzeption des Automaten in seiner Funktionalität erweiterbar ist und damit für den Entwickler eines Überwachungsautomaten bis hin zum Automaten für vollständig autonomes Fahren konzeptionell überschaubar und beherrschbar bleibt.

Die Umsetzung der Überwachung erfolgt in mehreren Ebenen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Dabei sind die Sensorebene, Verarbeitungsebene, Analyseebene und Informationsebene neben der realen Welt zu unterscheiden. Auf der Sensorebene müssen geeignete Eigenschaften der Szene und der Handlungen, d. h. der Aktionen, des Fahrers ausgewählt werden. Sensoren erfassen diese Größen messtechnisch.

Ein lernfähiges System basierend auf der SOM-Beschreibungstechnik kann daher flexibel auf seine veränderliche Umgebung reagieren.

Literatur:

- [1] Ahle, E.; Söffker, D.: A Cognitive-Oriented Architecture to Realize Autonomous Behavior – Part II: Application to Mobile Robotics, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Taipei, Taiwan, October 8-11, pp. 2221-2227, 2006.
- [2] Ahle, E.; Söffker, D.: A Concept for a Cognitive-Oriented Approach to Build Autonomous Systems, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Big Island, Hawaii, October 10-12, pp. 2929-2935, 2005.
- [3] Ahle, E.; Söffker, D.: Entwurf eines Überwachungsautomaten für Überholvorgänge von Kraftfahrzeugen, GMA-Kongress – Automatisierung als interdisziplinäre Herausforderung, Baden-Baden, 7.-8. Juni, Seiten 53-60, 2005.
- [4] P.C. Cacciabue, Modelling and Simulation of Human Behaviour in System Control, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [5] Söffker, D.: Systemtheoretische Modellbildung der wissensgeleiteten Mensch-Maschine-Interaktion, Logos Wissenschaftsverlag, Berlin, 2003, auch: Habilitationsschrift, Bergische Universität Wuppertal, 2001.
- [6] G. Strube, Kognition, in: Handbuch der Künstlichen Intelligenz, G. Görz, C.-R. Rollinger und J. Schneeberger, Hrg., Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2003.

Modellierung einer Gummispritzpresse mit einem temperaturgeregelten Einspritzprozeß

Ulf Kreutzer, Ferdinand Svaricek *

Volker Härtel **

* Institut für Systemdynamik und Flugmechanik
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
Tel. 089-6004-3581
Fax 089-6004-2082
Email: ulf.kreutzer@unibw.de

** Continental AG
Tel. 089-8414564
Fax 089-8948226
Email: volker.haertel@web.de

Schlüsselwörter: Vulkanisation, Modellbildung, Temperaturregelung, indirekte Temperaturmessung .

Der Gummispritzguß ist eines der wichtigsten Urformverfahren für Formteile in der Gummi- und Kautschukindustrie. Es ist ein zyklisches, diskontinuierliches Verfahren, bei dem sich die Verfahrensschritte Plastifizieren, Einspritzen und Vulkanisieren des Kautschuks, sowie Entformen der Werkstücke zyklisch wiederholen [1]. Die Dauer und die Güte des Vulkanisationsprozesses ist dabei stark temperaturabhängig, so daß der Kautschuk nach dem Einspritzen in die Kavitäten durch Wärmeleitung im Werkzeug von außen weiter erhitzt wird, um den Vulkanisationsvorgang zu beschleunigen.

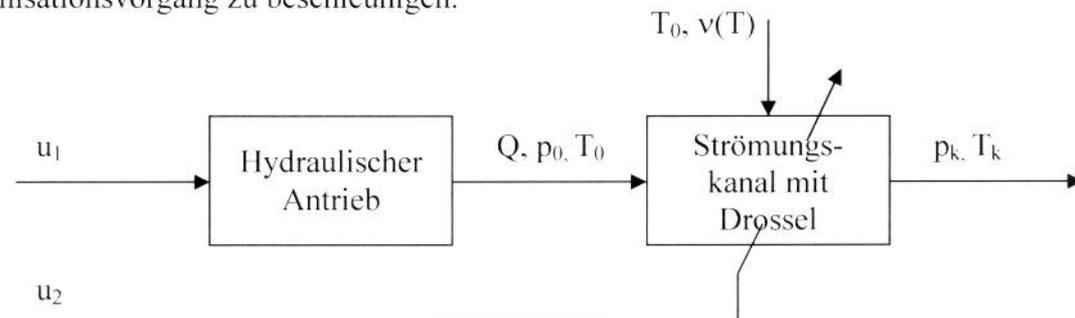


Abb. 1: Einfaches Blockschaltbild der Strecke

In einem neuen Verfahren soll die Umsetzung von Druckarbeit in thermische Energie so geregelt werden, daß nach Einspritzen des Kautschuks in die Form nur noch kurz nachgeheizt werden muß, so daß sich eine deutliche Verkürzung der Gesamtzykluszeit ergibt. Weiterhin liefert dieses neue Einspritzverfahren eine für eine homogene Vulkanisation günstigere Temperaturverteilung. Als zusätzliches Stellglied dient in diesem Verfahren eine Drossel (Abb. 1), über die durch eine Veränderung des Strömungswiderstandes die am Kautschuk geleistete Druckarbeit beeinflusst werden kann. Dabei wird durch eine unterlagerte Regelung der Geschwindigkeit des Hydraulikzylinders ein konstanter Volumenstrom Q eingepreßt. Die temperatur- und mischungsabhängige Viskosität $v(T)$ der Kautschukmischung kann man als Störgröße auffassen.

Standardmäßig stehen als Meßgrößen nur der Druck p_0 und der Volumenstrom Q des Fluids, sowie die Stellung der Drossel zur Verfügung. Eine direkte Messung der Kautschuktemperatur im Einspritzkanal bzw. in der Form ist nicht möglich, so daß eine Methode zur indirekten Temperaturmessung entwickelt werden muß. Diese indirekte Meßmethode nutzt die Temperaturverteilung in der Umgebung des Strömungskanals.

Grundlage für die Auslegung der Temperaturregelung ist ein hinreichend detailliertes nichtlineares Prozeßmodell, das die wesentlichen Prozeßgrößen beschreibt. Von zentraler Bedeutung ist die möglichst präzise Beschreibung der Temperatur- und Geschwindigkeitsverhältnisse in der hochviskosen Kautschukströmung im Einspritzkanal in Abhängigkeit vom eingepprägten Volumenstrom und der verwendeten Kautschukmischung. Die durch das Fließen des Kautschuks erzeugte Deformation des Kautschuks in der Spritzdüse läßt sich in Scherung und Dehnung aufteilen. Während die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung einer Strömung in einem Rohr durch zwei gekoppelte Differentialgleichungen in Abhängigkeit vom gewählten Stoffmodell (siehe z.B. [2]) gut beschrieben wird, wird die Dehnströmung pauschal durch Korrekturfaktoren berücksichtigt [3].

Messungen zeigen allerdings eine Abhängigkeit der Dehndruckverluste vom eingepprägten Volumenstrom, der vorliegenden Temperatur und der Einschnürung. Es muß also ein weitergehendes Modell des Fließverhaltens entwickelt werden, das sowohl die Scher- als auch die Dehnströmung des plastifizierten Kautschuks in Abhängigkeit vom eingepprägten Volumenstroms, der sich einstellenden Temperaturverteilung und des Stoffmodells beschreibt.

Für die Beschreibung des Fließverhaltens von Kautschuk kann im relevanten Bereich der Schergeschwindigkeit das Stoffmodell nach Ostwald-DeWaele (siehe z.B. [2]) verwendet werden. Da die Form des Temperaturprofils stark von den Parametern dieses Stoffmodells abhängt, wird konstruktiv sichergestellt, daß diese in Echtzeit abgeschätzt werden können, um die Temperaturspitzen der radialen Temperaturverteilung bestimmen zu können.

Primäres Ziel der Modellierung ist die Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Volumenstrom, der Drosselstellung, der Kautschuktemperatur und der Temperaturerhöhung $T_K - T_0$ (vgl. Abb.1) darstellt. Aus dieser Darstellung soll dann unter geeigneten Annahmen ein Zustandsraummodell entwickelt werden, das eine Temperaturfolgeregelung ermöglicht. Für diese Folgeregelung ist es notwendig, bestimmte Prozeßparameter (z.B. den Fließexponenten) und die Kautschuktemperatur in Echtzeit zu erfassen. Mittels des Modells sollen geeignete Ansätze zur Beobachtung der entsprechenden Größen entwickelt und getestet werden.

Darüber hinaus dient das Prozeßmodell zur Unterstützung und Vereinfachung der von aufwendigen Versuchsreihen und den persönlichen Erfahrungen der Konstrukteure geprägten Entwicklung der Spritzaggregate.

Literatur:

- [1] Byron Bird, Warren Stewart, Edwin Lightfoot; *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, New York, 1960
- [2] Walter Michaeli; *Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk*; Carl Hanser Verlag, München, 1991
- [3] Fritz Röthemeyer, Franz Sommer, *Kautschuktechnologie*, Carl Hanser Verlag, München, 2006

Automatische Differentiation zur Optimierung mechatronischer Systeme am Beispiel einer Parallelkinematik

Eckehard Münch

Regelungstechnik und Mechatronik
Universität Paderborn
Pohlweg 98, 33098 Paderborn
Tel. +49 (0) 5251- 60 5565
Fax +49 (0) 5251- 60 5579
Email muench@rtm.uni-paderborn.de

Schlüsselwörter: Algorithmische Differentiation, Identifikation, Kalibrierung, Optimierung, Sensitivitätsanalyse

Bei der Entwicklung mechatronischer Systeme kommen neben den analytischen Methoden der Synthese und Analyse zunehmend Optimierungsverfahren zum Einsatz. Der Entwurf mit Hilfe von Optimierungsverfahren besitzt den Vorteil, dass beliebige Ziele verfolgt werden können. Ebenso ist auch die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Ziele durch den Einsatz von Mehrziel-Optimierungsverfahren möglich. In der Praxis werden zur Optimierung häufig Abstiegsverfahren verwendet. Diese benötigen für ihre Arbeitsweise die Ableitungen (Gradienten) der definierten Zielgrößen bezüglich der freien Entwurfparameter.

Häufig verwendete Techniken zur Berechnung dieser Ableitungen sind Differenzenquotienten, symbolische Differentiation mit Hilfe von Computeralgebra-Systemen oder Verfahren zur schrittweisen Approximation. In diesem Beitrag wird ein anderer Ansatz, die Algorithmische Differentiation (AD), betrachtet. Sie ermöglicht die Berechnung der Ableitungen von Funktionen, die in Form eines Computerprogramms, bspw. erstellt in einer Hochsprache wie Fortran oder C, vorliegen. Gegenüber den traditionellen Techniken besitzt die AD folgende Vorteile: Die Ergebnisse sind im Rahmen der Maschinengenauigkeit exakt, die Berechnung ist effizient bezüglich der Rechenzeit, sowie skalierbar bezüglich der Größe des Computerprogramms, und die Anwendung dieser Technik erfolgt weitgehend automatisiert und daher nur mit einem Minimum an Aufwand für den Anwender. Die AD macht sich die Tatsache zu Nutze, dass jede Computerberechnung, unabhängig von der Komplexität, letztendlich aus einer Sequenz elementarer Rechenoperationen zusammengesetzt ist. Für diese elementaren Operationen sind die Ableitungen bekannt. Durch iteratives Anwenden der Kettenregel auf diese Sequenz wird das ursprüngliche Programm um Anweisungen zur Berechnung der Ableitungsinformation erweitert.

In diesem Beitrag wird ein Werkzeug zum automatischen Differenzieren von Simulationsmodellen für das CAE Werkzeug CAMEL-View vorgestellt. Die Simulationsmodelle liegen hier in Form von hierarchischen Blockdiagrammen vor. Es lässt sich zeigen, dass sich die AD direkt auf regelungstechnische Blockdiagramme anwenden lässt. Durch eine Transformation werden die Blockdiagramme um die gewünschten Ableitungsinformationen angereichert. Bei der Durchführung der Transformation wird zwischen Hierarchieelementen und Basiselementen unterschieden. Hierarchieebenen

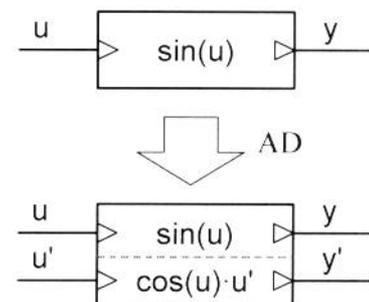


Abbildung 1: Anwendung der AD auf Blockdiagramme

enthalten keine mathematischen Funktionen, die Transformation reduziert sich hier auf das Routen der Verbindungen zwischen den Basiselementen und (Sub-)Hierarchien. Bei der Transformation der Basiselemente werden die mathematischen Funktionen bezüglich ihrer Syntax und Semantik analysiert und anschließend differenziert.

Die Funktionalität der AD wird am Beispiel der am RtM entwickelten Parallelkinematik Triplanar demonstriert. Die AD kommt hier an einem modellbasierten Verfahren zur Kalibrierung zum Einsatz. Die Kalibrierung basiert auf der Identifizierung der Geometriedaten eines Starrkörpermodell durch eine Optimierungsvorgang. Mit Hilfe der AD werden die Sensitivitäten der Optimierungsziele bezüglich der Kalibrierungsparameter berechnet und dem Optimierungsverfahren zur Verfügung gestellt. Der Entwicklungsaufwand für den Anwender besteht lediglich darin die Parameter in das vorhandene Starrkörpermodell zu integrieren, die Differentiation des Modells erfolgt anschließend vollautomatisch mit Hilfe des implementierten AD-Werkzeugs.

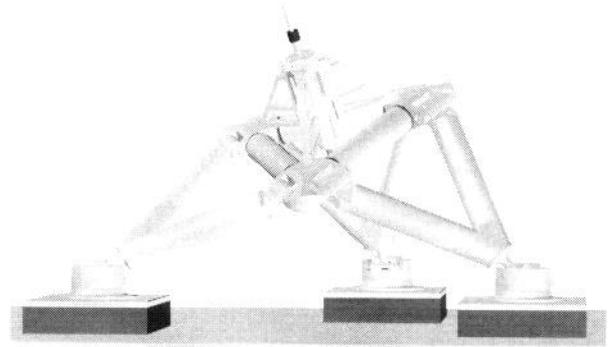


Abbildung 2: Parallelkinematik Triplanar

Literatur:

- [1] G. Corliss, C. Faure, A. Griewank, L. Hascoet, U. Naumann: „Automatic Differentiation of Algorithms – From Simulation to Optimization“, Springer-Verlag, New York, 2002.
- [2] P. Eberhard: „Zur Mehrkriterienoptimierung von Mehrkörpersystemen“, Diss., VDI-Fortschrittberichte, Reihe 11, Nr. 227, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [3] A. Griewank: „Evaluating Derivatives – Principles and Techniques of Algorithmic Differentiation“, Band 19 der Reihe Frontiers in Applied Mathematics. SIAM, Philadelphia, 2000.
- [4] C. Hillermeier: „Nonlinear Multiobjective Optimization – A Generalized Homotopy Approach“, Birkhäuser Verlag, Basel, 2001
- [5] H. D. Joos: „MOPS - Multi-Objective Parameter Synthesis - User's Guide V3.0“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2003.
- [6] E. Münch, A. Trächtler: „Observation of Gradients, by Means of Algorithmic Differentiation“, Proc. IECON'06, Paris, November, 2006
- [7] K. Röbenack: „Regler- und Beobachterentwurf für nichtlineare System mit Hilfe des Automatischen Differenzierens“, Habilitationsschrift, Shaker Verlag, Aachen, 2005.
- [8] K. Schittkowski: „Nonlinear Programming Codes“, Springer, Berlin, 1980.
- [9] S. Toepper: „Die mechatronische Entwicklung des Parallelroboters Triplanar“, Diss., VDI-Fortschrittberichte, Reihe 20, Nr. 267, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.

Agentenorientierten Softwareentwicklung für flexible und verlässliche eingebettete Echtzeitsysteme im Maschinen- und Anlagenbau

Andreas Wannagat

Birgit Vogel-Heuser

Eingebettete Systeme
Universität Kassel
Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel
0561/804-6021
0561/804-6022
wannagat@uni-kassel.de

Eingebettete Systeme
Universität Kassel
Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel
0561/804-6020
0561/804-6022
vogel-heuser@uni-kassel.de

Schlüsselwörter: Eingebettete Systeme, Agentensysteme, Echtzeit, Verfügbarkeit

Der Anteil dezentraler eingebetteter Systeme steigt in zahlreichen Anwendungsfeldern, wie der Kfz-Elektronik oder der Anlagenautomatisierung [ScZu03]. Zudem steigen die Anforderungen an die Flexibilität und den Funktionsumfang moderner automatisierungstechnischer Systeme. Der Einsatz agentenorientierter Methoden ist diesbezüglich ein geeigneter Ansatz diesen Anforderungen gerecht zu werden [WGU03]. Mit Agenten können flexible, anpassungsfähige Softwaresysteme entwickelt werden, welche die Verteilung von Informationen, Aufgaben, Ressourcen oder Entscheidungsprozessen der realen Problemstellung im Softwaresystem widerspiegeln. Es ist somit möglich, die gewünschte Flexibilität des Systems, bezüglich der Struktur oder des Verhaltens gezielt zu entwerfen. Nachteilig ist jedoch der Indeterminismus des Verhaltens des Gesamtsystems, der sich aufgrund von schwer vorhersagbaren Interaktionen ergibt [Jen00]. Dem gegenüber stehen statische Softwaresysteme, welche zwar einen hohen Determinismus aufweisen aber wenig flexibel in Bezug auf Änderungen der Struktur des Systems oder des Ablaufs des realen Prozesses sind. Mit der steigenden Komplexität der Systeme ist allerdings selbst mit einem statischen Entwurf die Vorhersagbarkeit immer weniger zu gewährleisten. Die Zahl der möglichen Zustände einer Anlage wird mit der Berücksichtigung von allen möglichen Fehlern, Ausfällen und externen Einflüssen (dynamische Umgebung) so groß, daß diese mit vertretbarem Aufwand kaum noch erfassbar sind und somit auch nicht behandelt werden können.

Das von der DFG geförderten Projekt AVE [AVE05], welches in Kooperation mit dem Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik der Universität Stuttgart bearbeitet wird, beschäftigt sich in diesem Kontext mit dem Konflikt, die Vorteile der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von agentenorientierter Software mit den spezifischen Anforderungen der Domäne der Echtzeitsysteme, wie Zeit- und Verlässlichkeitsanforderungen, zu verknüpfen. In einer detaillierten Analyse dieser Anforderungen wurde untersucht, wie die Eigenschaften der Anpassungsfähigkeit und Flexibilität prinzipiell die Anforderungen an Echtzeit- und Verlässlichkeitseigenschaften beeinflussen und wie umgekehrt Anforderungen an Echtzeit- und Verlässlichkeitseigenschaften die Anpassungsfähigkeit und Flexibilität beschränken können. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden Methoden und Konzepte für den Entwurf und die Implementierung von Agentensystemen auf gängiger Automatisierungshardware, insbesondere Speicher Programmierbare Steuerungen (SPS), entwickelt.

In diesem Rahmen wird ein Konzept für die Modellierung von Sicherheit in Agentensystemen vorgestellt, welches insbesondere den modularen Charakter von Agenten berücksichtigt.

Kernaspekt ist es, dem Entwickler einen Rahmen vorzugeben, der ihn dabei unterstützt ein möglichst lückenloses Sicherheitskonzept zu erstellen und ihm dabei genug Freiheiten lässt den Aufwand für die Strategien zur Fehlererkennung, Fehlerdiagnose und Fehlerbehandlung je nach Anforderung für jedes Modul individuell festzulegen. Des weiteren ist besonderer Wert darauf gelegt worden, dass die verwendeten Darstellungen und Diagramme aus der Domäne stammen und eine gute Vorlage für die spätere Implementierung auf automatisierungstechnischer Hardware bieten.

Literatur:

- [ScZu03] Schäuffele, J.; Zurawka, T.: Automotive Software Engineering. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2003
- [WGU03] Wagner, T., Göhner, P., Urbano, P.: Softwareagenten - Einführung und Überblick über eine alternative Art der Softwareentwicklung. Teil I: Agentenorientierte Softwareentwicklung. atp 45 (2003), H. 10, S. 48-57.
- [AVE05] AVE - Agenten für flexible und verlässliche eingebettete Echtzeitsysteme. <http://www.ias.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/ave.html>
- [Jen00] Jennings, N.R.: On agent-based software engineering. Artificial Intelligence 117, 2000, S. 227-296

LPV Gain Scheduling – Modellierung und Reglerentwurf am Beispiel der Füllungsregelung eines Ottomotors

A. Kwiatkowski

H. Werner

Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Hamburg Harburg
Eissendorfer Strasse 40, 21073 Hamburg
Tel. 040 42878 3215, Fax. 040 42878 2112
Email {kwiatkowski, h.werner}@tuhh.de

Schlüsselwörter: Gain scheduling, LPV-Systeme, Lineare Matrixungleichungen, Füllungsregelung

In der regelungstechnischen Praxis ergeben sich häufig anspruchsvolle Aufgaben durch nichtlineare Eigenschaften der Regelstrecken oder die Abhängigkeit von externen Größen. Vielfach kann die Systemdynamik in verschiedenen Arbeitspunkten zwar befriedigend durch lineare Modelle approximiert werden, die linearisierte Dynamik variiert jedoch zwischen diesen Arbeitspunkten erheblich. In der industriellen Applikation werden solche Regelstrecken üblicherweise mit Kennfeldreglern geregelt, d.h. es werden für verschiedene Arbeitspunkte lineare Regler entworfen, zwischen denen im Arbeitsbereich interpoliert wird. Weil die aktuellen Reglerverstärkungen damit an den Arbeitspunkt angepasst werden, spricht man von *Gain-Scheduling* Reglern. Probleme dieses intuitiven Ansatzes des 'Linearized Gain Scheduling' liegen darin, dass keine geschlossene Entwurfsmethodik existiert und es schwer ist, für das geregelte Gesamtsystem Aussagen über Stabilität und Regelgüte zu machen.

Solche Systeme, deren Arbeitspunktabhängigkeit sich durch zusätzliche Scheduling-Parameter modellieren lässt, können häufig durch die nichtlineare Modellklasse der *linearen Parameter-variablen Systeme* (LPV) beschrieben werden. Für diese Modellklasse sind Methoden der linearen optimalen Regelung zu Synthese-Methoden für Gain-Scheduling-Regler erweitert worden, die neben der Stabilität des geschlossenen Kreises auch die Einhaltung von Vorgaben an die Regelgüte garantieren [1], [2]. Dabei werden die Anforderungen an den Regelkreis in Form von *linearen Matrix-Ungleichungen* (LMI) formuliert, die mit effizienten Verfahren gelöst werden können [3]. Den genannten Vorteilen des Konzeptes stehen jedoch im Entwurfsprozess von der Modellierung bis zur Implementierung mehrere Probleme entgegen, für die in diesem Beitrag Lösungsmöglichkeiten vorgestellt werden:

- **Modellierung:** Die Bestimmung eines LPV-Modells aus einem gegebenen nichtlinearen Modell ist nicht eindeutig. Darüber hinaus unterscheiden sich verschiedene LPV-Modelle desselben nichtlinearen Modells möglicherweise erheblich in ihrer Eignung für den Reglerentwurf. In [4] wurden symbolische Werkzeuge für eine automatische Generierung von affinen LPV-Modellen vorgestellt, die zur Erleichterung der Auswahl Gütemaße für die verschiedenen Modelle angeben.
- **Modelloptimierung:** Ein Problem bei der Generierung von LPV-Modellen besteht darin, dass oft auch Systemverhalten repräsentiert wird, das die tatsächliche Regelstrecke nicht aufweist. Dieser Konservatismus resultiert aus einer Überabschätzung der Parametermenge, die den Arbeitsbereich des LPV-Modells

beschreibt. Ein Verfahren, das durch eine Hauptkomponentenanalyse eine geeignete Abbildung des Parameterraumes definiert und damit den Konservatismus der Modelle deutlich reduzieren kann wurde in [5] und [6] vorgestellt.

- Reglerentwurf: LMI-gestützte Entwurfsmethoden für LPV-Gain-Scheduling-Regler beruhen in der Regel auf einer konstanten quadratischen Lyapunov-Funktion, die Robustheit gegenüber unendlich schnellen Parameteränderungen garantiert und damit konservativ ist. Bislang vorgeschlagene Verfahren mit parameterabhängigen Lyapunov-Funktionen sind aus verschiedenen Gründen für praktische Anwendungen unattraktiv (u.a. beruhen sie auf einem *Gridding* des Parameterraums). Ein neues Syntheseverfahren, das auf der Idee quadratischer Separatoren beruht und diese Nachteile vermeidet, wurde in [8] vorgeschlagen. Dieses Verfahren, das auf der Kombination von LMI-Techniken und evolutionärer Suche beruht, erlaubt es die dynamische Ordnung und Struktur des Reglers frei vorzugeben.

Alle Schritte werden anhand des Entwurfs eines LPV-PID Reglers für die Füllung eines Ottomotors demonstriert, der in Kooperation mit der IAV GmbH an einem Versuchsfahrzeug experimentell getestet wurde und eine sehr gute Regelgüte erzielt.

Literatur:

- [1] P. Apkarian and P. Gahinet, "A convex characterization of gain-scheduled H1 controller," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 40, no. 5, pp. 853–864, 1995.
- [2] H. Kajiwara, P. Apkarian, and P. Gahinet, "LPV techniques for control of an inverted pendulum," IEEE Control Systems Magazine, vol. 19, no. 1, pp. 44–54, 1999.
- [3] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. SIAM, Philadelphia, 1994.
- [4] A. Kwiatkowski, M. Boll, and H. Werner, "Automated generation and assessment of affine LPV models," in Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control, 2006.
- [5] A. Kwiatkowski and H. Werner, "PCA-based parameter set mappings for LPV models with fewer parameters and less overbounding," IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006. (zur Veröffentlichung akzeptiert)
- [6] A. Kwiatkowski, S. Trimpe, and H. Werner, "Less conservative LPV models by combining parameter set mapping and set intersection," in Proc. of the European Control Conference, 2007, (submitted).
- [7] A. Kwiatkowski, J. Blath, H. Werner, and M. Schultalbers, "Application of LPV gain scheduling to charge control of a SI engine," in Proc. of IEEE International Symposium on Computer-Aided Control Systems Design, 2006.
- [8] S. S. Chughtai and H. Werner, "Synthesis of low order controllers for LPV systems using LMIs and evolutionary search," in Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control, 2006.