

23. - 25. Februar 2011

Programm

Kurzfassungen zum Download unter:

www.iosb.fraunhofer.de/?boppard

Mittwoch, 23. Februar 2011

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

Donnerstag, 24. Februar 2011

08:15 – 08:30 **Eröffnung und Begrüßung** (Stadthalle, Haupttagungsraum im EG)
Prof. A. Kugi

Haupttagungsraum im EG		S.	Tagungsraum im 3. OG	S.
08:30 – 10:00	Nichtlineare Regelungen Sitzungsleitung: Prof. K. Schlacher		Automatisierungstechnik: Werkzeuge und Methoden Sitzungsleitung: Prof. U. Epple	
08:30 – 09:00	Ein Beispiel zur Berücksichtigung von Symmetrien beim Reglerentwurf <i>Carsten Collon (Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Univ. d. Saarlandes, Prof. J. Rudolph, Gr. 25)</i>	1	Automatische generierte Simulationsmodelle verfahrenstechnischer Anlagen für den Steuerungstest <i>Mike Barth (Institut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Univ. Hamburg, Prof. A. Fay, Gr. 13)</i>	7
09:00 – 09:30	Zwei-Freiheitsgrad-Reglerentwurf eines Parallelroboters auf Basis einer Deskriptordarstellung <i>Maximilian Manderla (Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, Prof. U. Konigorski, Gr. 7)</i>	3	Durchgängige Werkzeugunterstützung für die Entwicklung komplexer geregelter Systeme <i>Christian Sonntag (Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung, TU Dortmund, Prof. S. Engell, Gr. 8)</i>	9
09:30 – 10:00	Optimale Steuerung durch DOMC mit Anwendungen am Doppelpendel <i>Julia Timmermann (Heinz Nixdorf Institut, Univ. Paderborn, Prof. A. Trächtler, Gr. 23)</i>	5	Profilbildung von Engineeringmodellen <i>Mathias Mühlhause (Institut für Automatisierungstechnik, Otto-von-Guericke Univ. Magdeburg, Prof. C. Diedrich, Gr. 20)</i>	11

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

10:30 – 12:00 Anwendungen 1: Fahrzeuge und Motoren Sitzungsleitung: Prof. A. Trächtler		Nichtlineare Systeme Sitzungsleitung: Prof. O. Sawodny		
10:30 – 11:00	Einsatz des Klopfensors zur Kalibrierung von Magnet-Injektoren für die Benzin-Direkteinspritzung <i>Konrad Christ (Institut für Industrielle Informationstechnik, Karlsruher Inst. für Technologie, Prof. F. Puente León, Gr. 30)</i>	13	Nonlinear Model Predictive Control of Fast Systems <i>Jasem Tamimi (Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik, TU Ilmenau, Prof. P. Li, Gr. 15)</i>	19
11:00 – 11:30	Adaptive Regelung mechatronischer Fahrwerkssysteme <i>Guido Koch (Lehrstuhl für Regelungstechnik, TU München, Prof. B. Lohmann, Gr. 22)</i>	15	Modellbasierte Regelung raumluftechnischer Anlagen <i>Jakob Rehr (Lehrstuhl für Mess- und Regelungssysteme, Alpen-Adria Univ. Klagenfurt, Prof. M. Horn, Gr. 5)</i>	21
11:30 – 12:00	Konzept eines kognitiven Prüfstands für die Mensch-Maschine-Schnittstelle am Beispiel eines Infotainment-Systems <i>Asem Eltahir (Institut für Regelungstechnik, TU Braunschweig, Prof. M. Maurer, Gr. 4)</i>	17	Modellierung des Verdampfungsverhaltens organischer Halbleiter im Hochvakuum <i>Martin Steinberger (Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, TU Graz, Prof. N. Dourdoumas, Gr. 7)</i>	23

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

14:30 – 16:00 Bahnplanungsmethoden Sitzungsleitung: Prof. R. Findeisen		Kognitive und verteilte Systeme Sitzungsleitung: Prof. B. Lohmann		
14:30 – 15:00	Vorausschauende probabilistische Sensoreinsatzplanung <i>Marco Huber (Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, Prof. J. Beyerer, Gr. 18)</i>	25	Modell-basierte Teleoperation <i>Carolina Passenberg (Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, Prof. M. Buss, Gr. 21)</i>	30
15:00 – 15:30	Sichere Pfadplanung in dynamischen Umgebungen mittels eines mengenbasierten Global-Dynamic-Window-Ansatzes <i>Sylvia Horn (Institut für Automatisierungstechnik, TU Dresden, Prof. K. Janschek, Gr. 9)</i>	27	Synchronisierung heterogener linearer Systeme <i>Kim Listmann (Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, Prof. J. Adamy, Gr. 7)</i>	32
15:30 – 16:00	Optimale Trajektorienplanung für Automobile <i>Julius Ziegler (Institut für Mess- und Regelungstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. C. Stiller, Gr. 17)</i>	29	Kognitive und robuste Stabilisierung einer Klasse nichtlinearer Systeme ohne vorausgesetzte Modellkenntnis <i>Fan Zhang (Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik, Univ. Duisburg-Essen, Prof. D. Söffker, Gr. 11)</i>	34

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

16:30 – 17:30 Plenarvortrag im Haupttagungsraum EG
Control of Nonlinear Systems: milestones, roadblocks and challenges
Prof. A. Isidori, Dipartimento di Informatica e Systemistica, Universita Sapienza, Rom

18:30 Abendessen im Rheinhotel Bellevue

Freitag, 25. Februar 2011

08:30 – 10:00 Identifikation und Beobachterentwurf Sitzungsleitung: Prof. J. Adamy		Ereignisbasierte und hybride Systeme Sitzungsleitung: Prof. O. Stursberg	
08:30 – 09:00	Klassifikationsgestützte Adaption eines robusten nichtlinearen Beobachters zur Fehlerdiagnose <i>Patrick Gerland (Mess- und Regelungstechnik, Univ. Kassel, Prof. A. Kroll, Gr. 19)</i>	35	Optimaler Entwurf vernetzter ereignisbasierter Regelungssysteme <i>Adam Molin (Fachgebiet Informationstechnische Regelung, TU München, Prof. S. Hirche, Gr. 21)</i>
09:00 – 09:30	Kalman-Filterung: Schätzung der Rauschkovarianzmatrizen mit garantierter positiver Definitheit <i>Martin Tiefenbacher (Institut für Mechanik und Mechatronik, TU Wien, Prof. S. Jakubek, Gr. 29)</i>	37	Flexible dezentrale Automatisierungs- und Regelungssysteme auf Basis von Softwareagenten <i>Stephan Pech (Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Univ. Stuttgart, Prof. P. Göhner, Gr. 27)</i>
09:30 – 10:00	Parameteridentifikation für zeitkontinuierliche Systeme mit Hilfe signalmodellgenerierter Modulationsfunktionen <i>Christian Schmid (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Univ. Erlangen-Nürnberg, Prof. G. Roppenecker, Gr. 12)</i>	39	Fehlertolerante Steuerung ereignisdiskreter Systeme <i>Yannick Nke (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Univ. Bochum, Prof. J. Lunze, Gr. 3)</i>

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

10:30 – 11:30 Anwendungen 2: Medizintechnik Sitzungsleitung: Prof. S. Leonhardt		Verteilt-parametrische Systeme Sitzungsleitung: Prof. J. Rudolph	
10:30 – 11:00	Regelung einer implantierbaren rotierenden Blutpumpe zur Linksherzunterstützung <i>Andreas Arndt (Institut für Automatisierungstechnik, Univ. Rostock, Prof. B. Lampe, Gr. 24)</i>	45	Vorsteuerungs-Entwurf für verteiltparametrische Systeme mit örtlich verteiltem Eingang <i>Florian Malchow (Institut für Systemdynamik, Univ. Stuttgart, Prof. O. Sawodny, Gr. 27)</i>
11:00 – 11:30	Objektorientierte Modellierung und Simulation des menschlichen Herzkreislaufsystems <i>Anja Brunberg (Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen, Prof. D. Abel, Gr. 1)</i>	47	Strömungsregelung mit aktiven, nachgiebigen Wänden <i>Nikolas Goldin (Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik, TU Berlin, Prof. R. King, Gr. 2)</i>

11:30 – 12:00 **Abschluss**

Preisverleihung durch einen Vertreter der TTTech Computertechnik AG

Aufruf für Boppard 2012

12:00 - 13:30 **Mittagessen** im Rheinhotel Bellevue

13:30 **Ende des Kolloquiums**

Ein Beispiel zur Berücksichtigung von Symmetrien beim Reglerentwurf

Carsten Collon *

Joachim Rudolph **

* Lehrstuhl für Systemtheorie und
Regelungstechnik
Universität des Saarlandes
66123 Saarbrücken

**Lehrstuhl für Systemtheorie und
Regelungstechnik
Universität des Saarlandes
66123 Saarbrücken
Telefon: 0681-302-64721
Fax: 0681-302-64722
j.rudolph@lrs.uni-saarland.de

Schlüsselwörter: Symmetrie, invarianter Reglerentwurf, kinematisches Fahrzeug

Für zahlreiche technische Prozesse lassen sich Modelle als Systeme gewöhnlicher nichtlinearer Differentialgleichungen angeben, die für eine Analyse von Systemeigenschaften sowie für den Entwurf von Regelungs- und Steuerungsalgorithmen genutzt werden können. Rückschlüsse über die Struktur der Modellgleichungen können insbesondere anhand ihrer Symmetrien gezogen werden, d.h. anhand von Transformationen, die Lösungen der Differentialgleichung aufeinander abbilden [2].

Bei der Betrachtung von Regelungsproblemen treten Symmetrien als Transformationen zutage, bezüglich deren Wirkung die Modellgleichungen forminvariant sind, d.h., die Modellgleichungen behalten auch in den transformierten Koordinaten ihre Form. Häufig handelt es sich hierbei um recht direkt geometrisch deutbare Abbildungen wie z.B. den Übergang zu anderen Standard-Koordinatensystemen oder Einheitenskalierungen. Mitunter haben diese Transformationen darüber hinaus eine „natürliche“ Bedeutung für das Regelungsproblem, so daß auch das um eine

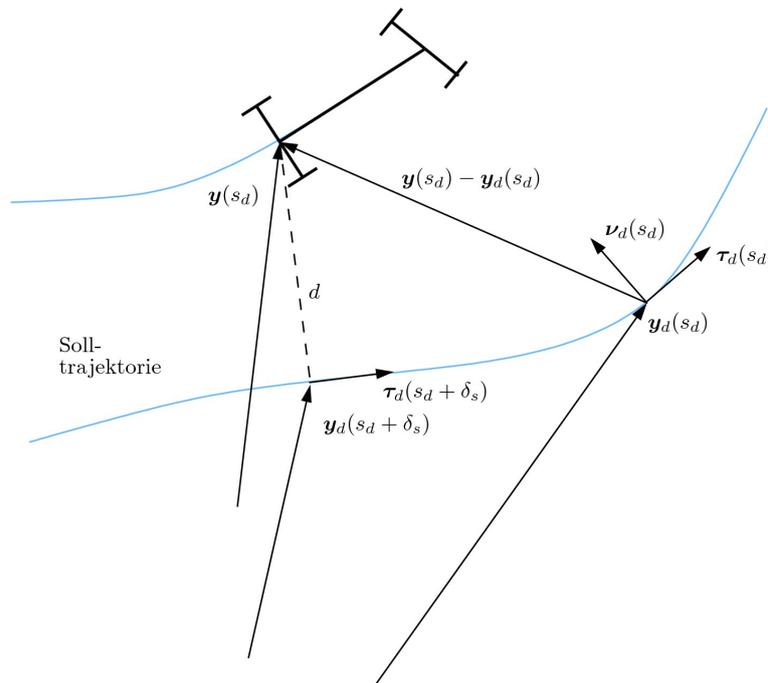


Abbildung 1: Geometrische Konstruktion eines invarianten Folgefehlers für das Beispiel des kinematischen Fahrzeugs

Regelung ergänzte System die betrachteten Symmetrieeigenschaften – z.B. die Invarianz bezüglich Koordinatenwechseln – aufweisen sollte. Es zeigt sich jedoch, daß Symmetrieeigenschaften durch Rückführungen verloren gehen können, d.h., Symmetrien können durch Rückführungen „gebrochen“ werden. Einen möglichen Ausweg bietet die Verwendung invarianter Fehler für den Reglerentwurf, d.h. von Fehlerfunktionen, die durch die Symmetrietransformationen unverändert bleiben. Dieser Ansatz führt auf sog. invariante (Folge-)Regler [6, 5, 4].

In diesem Beitrag werden Aspekte des invarianten Reglerentwurfs anhand des bekannten Modells eines kinematischen Fahrzeugs diskutiert. Ausgehend von der Identifikation der Symmetrie der Modellgleichungen bezüglich der Wirkung von Elementen der sog. speziellen Euklidischen Gruppe $SE(2)$ (Rotationen und Translationen in der Ebene), wird die Charakterisierung von Symmetrietransformationen mittels ihrer Wirkungen auf Lösungen motiviert, die sich auch über einen geometrischen Zugang zu Differentialgleichungen finden läßt.

Anschließend wird ein Folgeregler unter Verwendung eines geometrisch motivierten invarianten Folgefehlers entworfen. Zur Rekonstruktion nicht gemessener Zustandsgrößen wird die Rückführung um einen invarianten asymptotischen Beobachter ergänzt. Hierbei kommt ein Normalisierungsverfahren zur Anwendung, welches die Konstruktion invarianter Ausgangsfehler sowie einer invarianten Basis für den Tangentialraum des Zustandsraums erlaubt (siehe z.B. [1, 4]).

Literatur:

- [1] S. Bonnabel, P. Martin, P. Rouchon: *Symmetry-preserving observers*. IEEE Trans. Automat. Control, 53:2514–2536, 2008.
- [2] J. W. Grizzle, S. I. Marcus: *The structure of nonlinear control systems possessing symmetries*. IEEE Trans. Automat. Control, 30:248–258, 1985.
- [3] D. Guillaume, P. Rouchon: *Observation and control of a simplified car*. Proc. IFAC Motion Control, Grenoble, S. 63–67, 1998.
- [4] Ph. Martin, P. Rouchon, J. Rudolph: *Invariant tracking*. ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations, 10:1–13, 2004.
- [5] J. Rudolph: *Examples for the use of invariant errors in nonlinear control*. Proc. of the 48th International Scientific Colloquium (IWK), Technische Universität Ilmenau, 2003.
- [6] P. Rouchon, J. Rudolph: *Invariant tracking and stabilization*. In: D. Aeyels, F Lamnabhi-Lagarrigue, A. van der Schaft (Hg.): *Stability and Stabilization of Nonlinear Systems*, Kap. 14, S. 261–273, Springer-Verlag, 1999.

Zwei-Freiheitsgrad-Reglerentwurf eines Parallelroboters auf Basis einer Deskriptordarstellung

M. Manderla *

* Institut für Automatisierungstechnik
Technische Universität Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4
++49(0)6151 / 16-3704
++49(0)6151 / 16-6114
mmanderla@iat.tu-darmstadt.de

U. Konigorski **

** Institut für Automatisierungstechnik
Technische Universität Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4
++49(0)6151 / 16-3014
++49(0)6151 / 16-6114
ukonigorski@iat.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: Redundanter Parallelroboter, Nichtlineares Deskriptorsystem, Invariante Mannigfaltigkeit, Zwei-Freiheitsgrad-Regelung, Linear zeitvariante Ausgangsrückführung

Basierend auf einer Systembeschreibung in Deskriptorform behandelt der Beitrag die systematische Synthese einer Zwei-Freiheitsgrad-Regelungsstruktur für den in Abb. 1 dargestellten Parallelroboter. Das konkrete Ziel des Verfahrens besteht im Nachfahren gewünschter Trajektorien mit dem Tool-Center-Point.

Im Rahmen der strukturierten Analyse parallelkinematischer Strukturen bietet sich in vielen Fällen die modulare Zerlegung des Gesamtsystems in einzelne Teilsysteme an. Die damit einhergehende Modellbildung ist häufig intuitiver und weit weniger komplex als die direkte Herleitung eines Modells in Minimalkoordinaten. Bei der Aggregation der einzelnen dynamischen Komponenten zum Gesamtsystem ergeben sich jedoch üblicherweise algebraische Kompatibilitätsbedingungen. Im Vergleich zu gewöhnlichen Zustandsmodellen ist die numerische Integration, aber auch die weitere regelungstechnische Behandlung bei den resultierenden Deskriptorsystemen erheblich aufwändiger [1]. Der Beitrag beschreibt eine Möglichkeit zum Entwurf einer Trajektorienfolgeregung, welche auf der direkten Verwendung einer differential-algebraischen Systembeschreibung beruht. Unter Verwendung einiger differential-geometrischer Betrachtungen [2,3], dem Konzept der invarianten Mannigfaltigkeit sowie der Definition von fiktiven Ein- und Ausgangsgrößen lässt sich eine nichtlineare Rückführung bestimmen. Diese ermöglicht darüber hinaus die Überführung des Deskriptorsystems in ein Zustandsmodell.



Abbildung 1: Parallelroboter

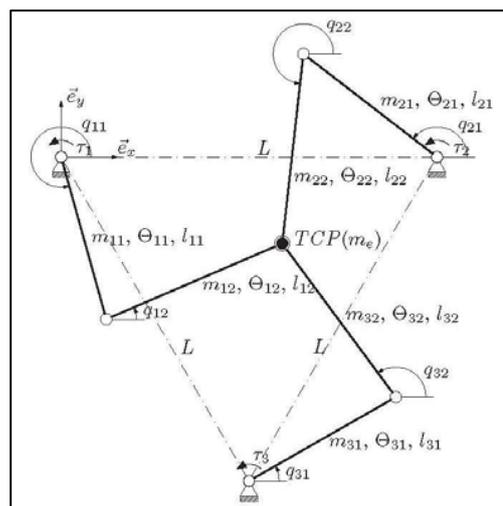


Abbildung 2: Mechanische Struktur

Neben dem Entwurf einer stabil entkoppelnden Rückführung aller Deskriptorvariablen wird somit auch die numerische Simulation des geregelten Systems mit Standardverfahren möglich. Genutzt wird dies lässt sich für einen einfachen nichtlinearen Vorsteuerungsentwurf.

Darüber hinaus ermöglicht die Linearisierung des Systemmodells entlang der erhaltenen Trajektorie die Ableitung eines linearen zeitvarianten Fehlermodells, welches dem Entwurf einer stabilisierenden Ausgangsrückführung dient [4]. Diese basiert auf einem Beobachter und dem klassischen Entwurf eines Riccati-Reglers. Die Zwei-Freiheitsgrad-Struktur ist in Abb. 3 dargestellt [5].

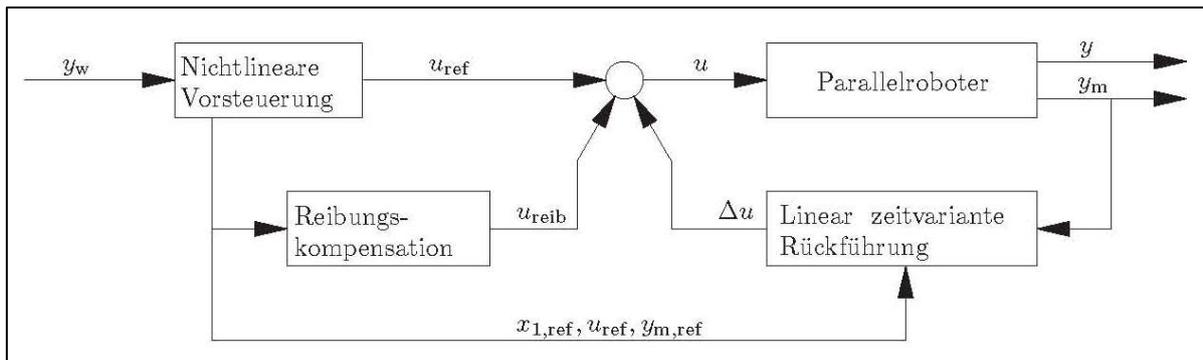


Abbildung 3: Zwei-Freiheitsgrad-.Regelungsstruktur

Verifiziert werden die Ergebnisse in einem Laborversuch.

Literatur:

- [1] J. Baumgarte, *Stabilization of constraint and integrals motion in dynamical systems*, Comput. Methods Appl. Mech. Engng. 1 (1972), S. 1-16
- [2] A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, Springer-Verlag, London, 1995
- [3] H. Nijmeijer, A. van der Schaft, *Nonlinear Dynamical Control Systems*, Springer-Verlag, New York, 1990
- [4] C. Hopp, *Trajektorienfolgeregelung mittels linear-zeitvarianter Ausgangsrückführungen*, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2005
- [5] M. Manderla, U. Konigorski, *Modelling, simulation and control of a redundant parallel robotic manipulator based on invariant manifolds*, Math. Comput. Modell. Dyn. Syst. 16 (2010) S. 95-113

Optimale Steuerung durch DMOC mit Anwendung am Doppelpendel

Julia Timmermann*

* Heinz Nixdorf Institut
 Universität Paderborn
 Regelungstechnik und Mechatronik
 Pohlweg 98
 05251/605574
 05251/605579
 Julia.Timmermann@hni.upb.de

Ansgar Trächtler **

** Heinz Nixdorf Institut
 Universität Paderborn
 Regelungstechnik und Mechatronik
 Pohlweg 98
 05251/605580
 05251/605579
 Ansgar.Trächtler@hni.upb.de

Schlüsselwörter: Nichtlineare Regelung, optimale Steuerung, gain-scheduling Regler, Doppelpendel mit Linearantrieb, Mehrzieloptimierung

In der Regelungstechnik werden unterschiedliche Pendelsysteme häufig als Forschungsobjekt für unteraktuierte, nichtlineare mechanische Systeme verwendet. Trotz vielfältiger Analysen ist der Aufschwung eines Mehrfachpendels immer noch eine herausfordernde Aufgabe und man kann an diesem Beispiel die Effektivität der Steuerungstheorie und der Regelungstechnik aufzeigen.

In diesem Beitrag nutzen wir eine Kombination von Steuerung und Regelung, um verschiedene Manöver eines Doppelpendels durchzuführen und zu stabilisieren. Dieser Ansatz wurde auch schon in anderen Arbeiten behandelt, siehe z. B. [1]. Die neue Idee dieser Arbeit ist es, die Steuerungstrajektorien des Doppelpendels mittels optimaler Steuerungsmethoden auszulegen. Dies hat zum einen den Vorteil, dass

systembedingte Nebenbedingungen schon im Entwurf einfach berücksichtigt werden können und zum anderen lässt sich durch die Gewichtung mehrerer Zielgrößen in der Optimierung in natürlicher Weise eine Mehrzieloptimierung durchführen.

Zur Berechnung der Steuertrajektorien zwischen beliebigen Ruhelagen des Doppelpendels verwenden wir die Methode „Discrete Mechanics and Optimal Control“ (DMOC, siehe auch [2]), die aus einem Algorithmus zur Berechnung optimaler

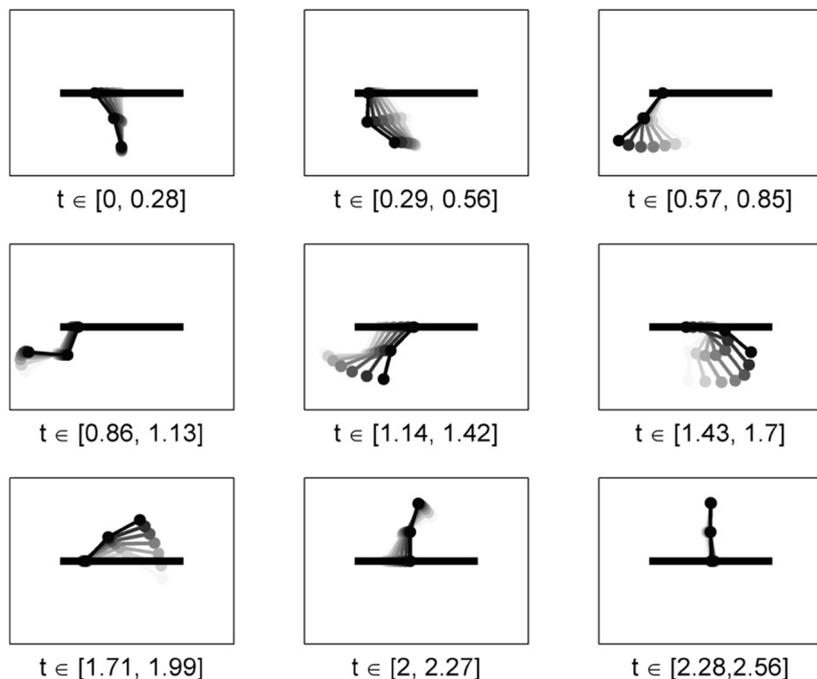


Abbildung 1: Aufschwung des Doppelpendels

Steuerungen für mechanische Systeme besteht. Das Verfahren basiert auf der direkten Diskretisierung der variationellen Struktur des mechanischen Systems. Dabei werden die Gleichungen des Lagrange-d'Alembert Prinzips so diskretisiert, dass sich strukturerehaltende Gleichungen ergeben, die als Nebenbedingungen des resultierenden endlich-dimensionalen nichtlinearen Optimierungsproblems dienen. Dieses Problem kann dann mit Standardoptimierungsmethoden, zum Beispiel SQP (sequentielle quadratische Programmierung), gelöst werden. Eine dieser berechneten Trajektorien für den Aufschwung des Doppelpendels ist in Abbildung 1 zu sehen.

Der zweite Schritt besteht im Entwurf einer geeigneten Regelung zur Stabilisierung der zuvor berechneten Steuertrajektorie. Hierfür haben wir einen gain-scheduling Ansatz gewählt, da er eine sehr einfache und bewährte Methode zur Regelung nichtlinearer Systeme darstellt. Für die Auslegung dieses Reglers wird das System entlang der berechneten Steuertrajektorie in mehreren Arbeitspunkten linearisiert und für jedes der resultierenden linearen Teilmodelle haben wir einen LQ-Regler entworfen. Während des Aufschwungmanövers des Doppelpendels wird dann jeweils der Regler aktiviert, der der aktuellen Situation des Pendels am besten entspricht.

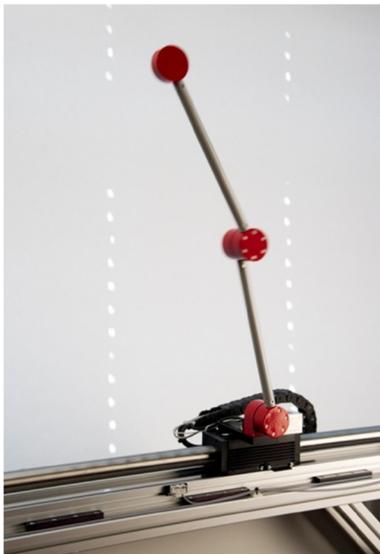


Abbildung 2: Prüfstand des Doppelpendels

Mit dieser Methode konnten gute Ergebnisse für verschiedene Manöver des Doppelpendels berechnet werden. Es ist gelungen, Trajektorien für den Übergang zwischen beliebigen Ruhelagen des Doppelpendels zu bestimmen. Bei der Berechnung wurde eine Mehrzieloptimierung verwendet, in der die beiden Ziele Aufschwungzeit und Stellenergie berücksichtigt wurden. Dadurch konnten unterschiedliche Bewegungen für den Aufschwung des Pendels in die instabile obere Ruhelage erzeugt werden, die dann jeweils einen Kompromiss zwischen der benötigten Zeit und Energie des Manövers darstellen.

Um Experimente durchführen zu können wurde ein Prüfstand des Doppelpendelsystems auf einem linear geführten Wagen aufgebaut (Abbildung 2), an dem die mit DMOC berechneten Manöver realisiert wurden.

Literatur:

[1] Graichen, K., Treuer, M., und Zeitz, M. (2007). Swing-up of the double pendulum on a cart by feedforward and feedback control with experimental validation. In *Automatica* 43, 63-71

[2] Junge, O., Marsden, J.E., und Ober-Blöbaum, S. (2005). Discrete mechanics and optimal control. In *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*. Prag, Tschechische Republik.

Automatisch generierte Simulationsmodelle verfahrenstechnischer Anlagen für den Steuerungstest

M.Sc. Mike Barth *

* Institut für Automatisierungstechnik
Helmut-Schmidt-Universität
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg
+49 (0)40 6541 - 2741
+49 (0)40 6541 - 2004
mike.barth@hsu-hh.de

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay **

** Institut für Automatisierungstechnik
Helmut-Schmidt-Universität
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg
+49 (0)40 6541 - 2719
+49 (0)40 6541 - 2004
alexander.fay@hsu-hh.de

Schlüsselwörter: Modelica, AutomationML, Modellgenerierung, Steuerungstest

Sicherzustellen, dass Steuerungsprogramme in Prozessleitsystemen (PLS) korrekt – entsprechend der Kundenanforderungen – implementiert wurden, ist eine wesentliche Aufgabe im Engineering von Automatisierungssystemen. Da die Anforderungen nicht formalisiert vorliegen, werden dazu umfangreiche Tests durchgeführt. Hier wird eine Methode vorgestellt, mithilfe derer das Test-Engineering durch den Einsatz von automatisch generierten Simulationsmodellen unterstützt und verkürzt wird. Ausgangspunkt war die Hypothese, dass es möglich sein sollte, die in CAE-Werkzeugen vorliegenden Anlagenplanungsdaten für die automatische Generierung eines Simulationsmodells der Anlage zu nutzen [1], welches genau genug sein sollte, um valide Testergebnisse zu gewährleisten. Als wichtigstes Planungsdokument verfahrenstechnischer Anlagen beinhaltet das Rohrleitungs- und Instrumenten-(R&I)-Fließbild sowohl die Komponenten als auch die Topologie der Anlage gemeinsam mit den für das PLS-Engineering relevanten Funktionen. In seiner durch moderne objektorientierte CAE-Werkzeuge verwalteten Form bietet es die Möglichkeit der Übertragung aller für die Generierung eines ebenfalls objektorientierten Anlagenmodells benötigten Elemente über offene Datenaustauschformate, wie z.B. AutomationML [2]. Um diese Elemente und Strukturen in ein Anlagenmodell zu überführen, wird die gleichungsbasierte objektorientierte Bibliothek Modelica.Fluid [3] verwendet. Als (CAE-) Modell-zu-(Simulations-)Modell-Transformation (MzM) bildet die implementierte Software Teile modellgetriebener Ansätze, insbesondere der darin beinhalteten Transformationsregeln, ab. Diese Regeln sind zentral hinterlegt und können an ggf. eintretende Änderungen, sowohl auf CAE- als auch auf Simulationsseite, adaptiert werden. Durch die mit der objektorientierten Architektur (C# und LINQ) des Modellgeneratoralgorithmus erfolgte Umsetzung der MzM-Transformationen bleiben alle Parameter und Verbindungen ihren jeweiligen Trägerelementen zugeordnet. In diesem Zusammenhang kann die in Abbildung 1 mitte rechts dargestellte Durchflussregelung, welche im physikalischen Modell zunächst eine Trennung in (Durchfluss-) Sensor und Stellventil erfährt, für weiterführende Schritte weiterhin als ein Modul betrachtet werden. Hierdurch bleibt die Relation zu den zu testenden Objekten der Leittechnik - im vorliegenden Fall ein Funktionsblock zur Regelung des Durchflusses - bestehen. Mithilfe des generierten Anlagenmodells wird es möglich, sowohl rein virtuelle Steuerungstests als auch „Hardware-in-the-Loop“ (HIL)-Prüfungen durchzuführen. Im Gegensatz zur rein virtuellen Variante, welche in Verbindung mit einer emulierten (Soft-)Steuerung betrieben wird, ergänzt die in Abbildung 1 dargestellte HIL-Konfiguration die implementierungsbegleitenden Tests von Funktionsblöcken, Ver-

regelungen und Schrittketten um die für die Werksabnahme des Leitsystems (FAT) notwendigen Kommunikationsparameter (z.B. Feldbusadressen). Parallel zur Generierung des simulationsfähigen Anlagenmodells wird eine Visualisierung erzeugt, welche den PLS-Test-Ingenieur bei optionalen Parametrierungen sowie bei der Bedienung und Beobachtung der Simulation unterstützt.

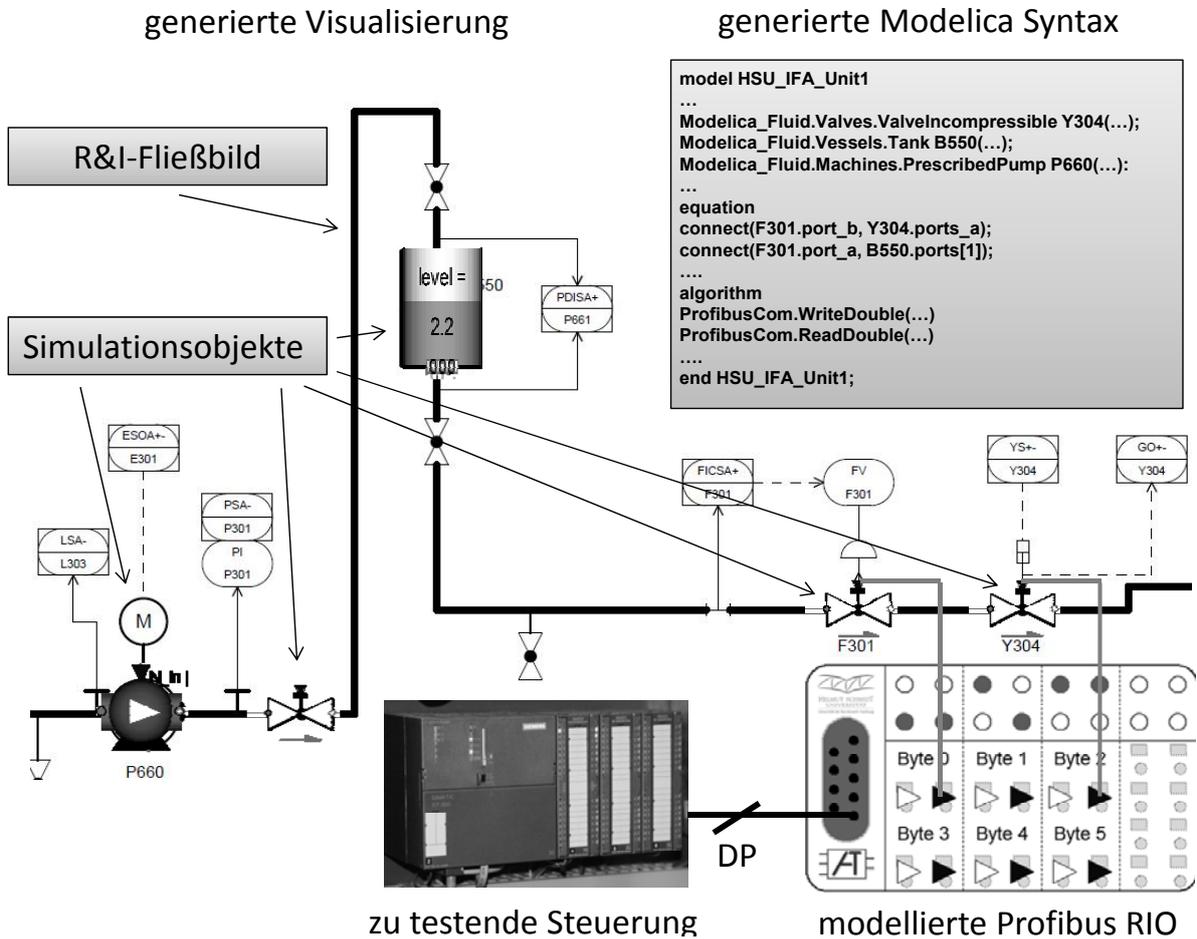


Abbildung 1: HIL-Konfiguration mit Anlagen-/Kommunikationsmodell und Steuerung

Als die Modellgenerierung ergänzende Aspekte beinhaltet der Ansatz die Generierung von Skripten für die Simulationslaufdefinition und -dokumentation sowie die Einbeziehung von Engineering-Export-Formaten, wie z.B. PLCopen XML, für die Kommunikationsinitialisierung.

Literatur:

- [1] Barth, M.; Fay, A.: Automatische Generierung von objektorientierten Simulationsmodellen für die Unterstützung des PLS-Test-Engineerings. In: Tagungsband "EKA 2010 - Entwurf komplexer Automatisierungssysteme", 25.-27. Mai 2010, Magdeburg, S. 235-244.
- [2] Barth, M.; Strube, M.; Fay, A.; Weber, P.; Greifeneder, J.: Object-oriented engineering data exchange as a base for automatic generation of simulation models. In: Tagungsband "IEEE IECON 2009", Porto, Portugal, 03.-05. November 2009 S. 2485-2490.
- [3] Franke, R.; Casella, F.; Sielemann, M.; Proless, K.; Otter, M.; Wetter, M.: Standardization of Thermo-Fluid Modeling in Modelica.Fluid. In: Tagungsband "7th Modelica Conference 2009", Como; Italy; September 2009; S. 122-131.

Durchgängige Werkzeugunterstützung für die Entwicklung komplexer geregelter Systeme

Christian Sonntag

Sebastian Engell

Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung
Technische Universität Dortmund
Emil-Figge-Strasse 70, 44227 Dortmund
Telefon: +49 231 755 {5166 | 5126}
Fax: +49 231 755 5129
E-Mail: {c.sonntag|s.engell}@bci.tu-dortmund.de

Schlüsselwörter: Modellbasierte Entwicklung, Durchgängige Entwicklung, Werkzeugintegration, Modellaustausch, Steuerungsauslegung

Die durchgängige, zuverlässige und effiziente Entwicklung komplexer heterogener technischer Systeme und deren Steuerungs- und Regelungssysteme, z.B. in der Fertigungs-, der Automobil-, oder der chemischen Industrie, ist eine der größten Herausforderungen im Ingenieursbereich. In allen Entwicklungsstufen, von der anfänglichen Spezifikation des Systems über das Basis- und das Detaildesign bis zur Implementierung und Inbetriebnahme, sind die Entwicklungsingenieure mit zahlreichen Schwierigkeiten und Herausforderungen konfrontiert. Die Entwicklungsingenieure nutzen oft eine Vielzahl verschiedener Softwarewerkzeuge, um spezifische Entwicklungsprobleme zu lösen, und erzeugen dabei eine große Zahl von Designdokumenten und (oft inkompatiblen) Modellen der System- sowie der Steuerungs- oder Regelungskomponenten. Die Modelle und die Designdokumentation sind stark voneinander abhängig. So sind abstrakte Modelle aus frühen Entwicklungsphasen, die z.B. für die Produktionsplanung erstellt werden, eng verzahnt mit detaillierten Modellen derselben System- oder Steuerungskomponenten, die in späteren Entwicklungsstufen für die Auslegung von Sicherheitssteuerungen oder optimierenden Regelungen genutzt werden. Entwicklungen anhand des detaillierten Modells können daher dazu führen, dass sich das Systemverhalten auch auf einer abstrakteren Stufe ändert. Als weiteres Beispiel können Änderungen von Entwicklungsparametern in einem Entwicklungsschritt dazu führen, dass die Basis einer früheren Entwicklungsentscheidung ungültig wird. Um solche Inkonsistenzen und die daraus resultierenden Fehler während der Entwicklung zu vermeiden, ist ein strukturierter, durchgängiger und integrierter werkzeuggestützter Entwicklungsansatz notwendig.

Im europäischen Forschungsprojekt *MULTIFORM* [1] wird ein softwarebasierter Ansatz für die durchgängige modellbasierte Entwicklung komplexer technischer Systeme entwickelt, der die oben beschriebenen Probleme konsistent lösen soll. Dieses *MULTIFORM Design Framework* erlaubt es, Entwicklungsprozesse in einem generischen Rahmen zu definieren und einen modellbasierten Entwicklungsansatz konsistent über alle Stufen der Entwicklungs- und Regelungshierarchie zu nutzen. Hierfür bietet es konsistente Mechanismen z.B. für die Propagation von Entwicklungsparametern zwischen den Entwicklungsstufen, für die konsistente Modell- und Ergebnisverwaltung, für die automatisierte Erkennung von Designkonflikten und für die integrierte Modellierung des Systems und seiner Steuerungen und Regelungen. Letzteres wird erreicht durch die Anbindung verschiedener modellbasierter Werkzeuge und Modellformalismen an das *Compositional Interchange Format (CIF)* [2], ein generisches Austauschformat für

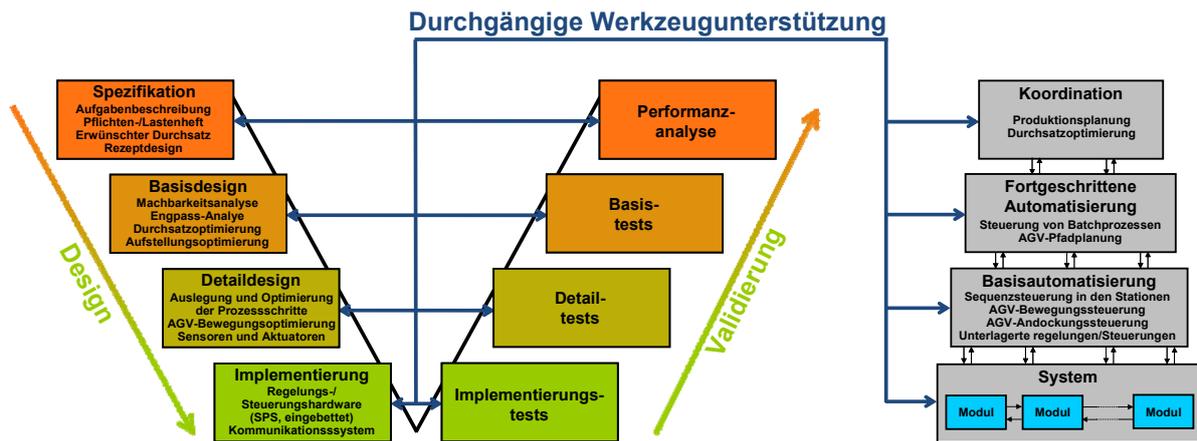


Bild 1: Entwicklungs- und Regelungshierarchien für eine rohrlose Miniaturanlage

hybride dynamische Modelle. Diese Anbindungen erweitern das Spektrum der benutzbaren Werkzeuge für einen Entwicklungsschritt und vereinfachen die modellbasierte Entwicklung in einer heterogenen Entwicklungsumgebung beträchtlich.

Dieser Vortrag gibt eine Übersicht über die Konzepte und Ergebnisse des *MULTIFORM*-Projekts anhand eines praktischen Beispiels, der modellbasierten Entwicklung einer rohrlosen Miniaturanlage mit gesteuerten Robotern. Die Entwicklung einer solchen Anlage stellt Herausforderungen auf allen Ebenen der Entwicklungs- und Regelungshierarchien, wie in Bild 1 gezeigt, anhand derer im Vortrag die Konzepte der *MULTIFORM Design Framework* erklärt werden. Abschließend werden die Vereinfachungen, die durch die Werkzeugintegration durch Modellaustausch erreichbar sind, anhand eines weiteren praktischen Beispiels belegt, in dem zunächst das Modell einer chemischen Anlage in *gPROMS* [3] erstellt und dann algorithmisch in das *CIF* übersetzt wird. Mithilfe eines Werkzeugs zur systematischen Erstellung von Steuerungen [4] wird dann eine Steuerung als *Sequential Function Chart (SFC)* generiert, die nachfolgend ebenfalls algorithmisch in das *CIF* übersetzt wird [5]. Das gesteuerte Anlagenmodell wird abschließend zur weiteren Analyse algorithmisch in die *Modelica*-Sprache [6] übersetzt.

Literatur:

- [1] EU-Forschungsprojekt *MULTIFORM*, gefördert im 7. EU-Rahmenprogramm (Vertragsnummer: INFSO-ICT-224249), <http://www.ict-multiform.eu>.
- [2] D. A. van Beek, M. A. Reniers, R. R. H. Schifflers und J. E. Rooda: Foundations of a compositional interchange format for hybrid systems. In *Hybrid Systems: Computation and Control*, Springer, 2007, LNCS-Band 4416, Seiten 587–600.
- [3] *gPROMS*, Process Systems Enterprise Ltd. (PSE), 2009, <http://www.psenderprise.com/gproms>.
- [4] S. Fischer, M. Hüfner, C. Sonntag und S. Engell: Systematic Generation of Logic Controllers in a Model-based Multi-formalism Design Environment. Erscheint in *Proc. 18th IFAC World Congress*, Mailand, Italien, 2011.
- [5] C. Sonntag und S. Fischer: Translating Sequential Function Charts to the Compositional Interchange Format for Hybrid Systems. Erscheint in *Proc. 49th Conf. on Decision and Control (CDC'10)*, Atlanta, USA, 2010.
- [6] *The Modelica Language Specification 3.2*, The Modelica Association, 2010, <http://www.modelica.org>.

Profilbildung von Engineeringmodellen

Mathias Mühlhause *

* Institut für Automatisierungstechnik
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
+49-391-6712920
+49-391-6711186
mathias.muehlhause@ovgu.de

Schlüsselwörter: Engineering, Engineeringmodelle, Durchgängige Informationsmodellierung, Modellklassifikation

Die Erstellung, Errichtung und der Betrieb von Produktionsanlagen ist durch eine Globalisierung der Märkte und damit einhergehend durch einen steigenden Kostendruck geprägt. Studien wie AIDA [1] für den Bereich des Automobilbaus oder INTECHNO Consulting [2] für verfahrenstechnische Anlagen belegen, dass ein wesentlicher Kostenfaktor für zu erbringende Engineeringdienstleistungen investiert wird. Löwen et al. [3] bewerten den Anteil der Engineeringleistungen je nach Domäne zwischen 15 – 50% der Gesamtprojektkosten. Neben Aspekten der Projektorganisation sind nach [2] wesentliche Faktoren zur Verringerung von Engineeringkosten:

- Effiziente Engineeringwerkzeuge
- Globales (verteiltes) und simultanes Lösen von Engineeringaufgaben
- Automatisiertes Dokumentenmanagement
- Effizientere und Online-abgewickelte Angebotsvorgänge mit Subkontraktoren
- Verbesserung des Informationsmanagements von Prozess und Anlage im Betrieb

Werden diese Punkte zu einer Kernaussage zusammengefasst, dann sind die zwei wesentlichen Forderungen einerseits die nach einer nutzergerechte Extraktion relevanter Information zum Lösen einer bestimmten Aufgabe und andererseits die nach einer Unterstützung der Arbeitsprozesse über die gesamte Nutzzeit einer Anlage. Durch diese Maßnahmen kann eine zeit- und kostensparende Unterstützung des Ingenieurs erreicht werden, da z.B. Aufwand zum Finden von Informationen oder das manuelle Übertragen wieder verwendbarer Informationen reduziert wird.

Ziel des vorliegenden Beitrages ist ein Vorschlag zur Modellierung und Nutzung von Anlageninformationen für Aufgaben des Engineerings. Der Begriff Engineering umfasst dabei nicht nur Aufgaben der Planung, Realisierung und Inbetriebnahme einer Anlage, sondern gemäß [4] auch Ingenieurleistungen während des Betriebs wie z.B. zur Instandhaltung, Modernisierung oder Prozessoptimierung.

Ausgangspunkt ist, dass die bestehenden Werkzeuge über Schnittstellen, die proprietär oder auf Standards basierend ausgeprägt sein können, Projektdaten austauschen können. Eine durchgängige Nutzung ist jedoch aufgrund der heterogenen Informations- bzw. Datenmodelle der Werkzeuge nicht Stand der Technik.

Daher werden im Beitrag Kriterien zur Klassifikation von Informationsmodellen vorgeschlagen, so dass eine Bewertung der gemeinsamen Modellelemente und -strukturen als Kern einer durchgängigen Informationsnutzung bewertet werden kann. Gruppen von Bewertungskriterien sind z.B.:

- Aufbau und semantischer Gehalt einer Information
- Beziehungstypen zwischen Informationen
- paradigmatische Kriterien, wie z.B. der Formalisierungs- oder Abstraktionsgrad
- anwendungsbezogene Kriterien
- implementierungsbezogene Kriterien

Das Ergebnis dieser Bewertung ist eine Einordnung der betrachteten Informationsmodelle in Modellprofile. Ein Modellprofil ist eine Abstraktion eines Modelltyps. Es erlaubt einen besseren Vergleich konkreter Informationsmodelle des Engineerings, so dass für einen Anwendungsfall deren Schnittmengen evaluiert werden können.

Aufbauend auf den Klassifikationskriterien wird eine implementierungsneutrale Referenzarchitektur für eine durchgängige Informationsmodellierung typischer Engineeringmodelle abgeleitet. Es umfasst sowohl ein Ebenenmodell zur Einordnung und Nutzung vorhandener Informationsmodelle als auch Vorgaben zur Informations- und Relationsmodellierung. Der Beitrag wird durch ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Instandhaltung abgeschlossen.

Literatur:

- [1] Automation ML: AIDA-Studie "Cost structure analysis of controls and robotics", zitiert nach: [http://www.automationml.org/index.php?option=com_content&view=article &id=26:aml&catid=16:events&Itemid=31](http://www.automationml.org/index.php?option=com_content&view=article&id=26:aml&catid=16:events&Itemid=31), zuletzt geprüft am 1.11.2010
- [2] INTECHNO Consulting: Markt-, Strategie- und Technologiereport « Process Automation Markets 2010", Basel, 2003
- [3] Löwen et al. : Modellierung technischer Systeme - Potenziale im Projektgeschäft durch den Einsatz von modellbasiertem mechatronischem Engineering, Erlangen, 2009
- [4] Fay, A.: Effizientes Engineering komplexer Automatisierungssysteme, In: Schnieder, E. (Hrsg.): Wird der Verkehr automatisch sicherer? Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge des integrierten Systementwurfs zur Fahrzeug- und Verkehrsautomatisierung. Braunschweig, 2009

Einsatz des Klopfensors zur Kalibrierung von Magnet-Injektoren für die Benzin-Direkteinspritzung

Dipl.-Ing. Konrad Christ *

Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León *

* Institut für Industrielle Informationstechnik
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Hertzstr. 16, D-76187 Karlsruhe
 Tel.: 0721/608 4622
 Fax: 0721/608 4500
 E-Mail: christ@kit.edu

Schlüsselwörter: Benzin-Direkteinspritzung, Kalibrierung, Körperschall, Klopfsensor, Signalverarbeitung, Kennfeldanpassung

Der Beitrag beschäftigt sich mit der Optimierung der Kraftstoffeinspritzung bei Verbrennungsmotoren mit Benzin-Direkteinspritzung. Die Genauigkeit der Dosierung der eingespritzten Kraftstoffmenge spielt eine entscheidende Rolle in Bezug auf Abgasverhalten und Kraftstoffverbrauch und steht daher im Fokus der Arbeit. Ziel ist es, die Genauigkeit über die gesamte Lebensdauer des Verbrennungsmotors zu erhöhen und fertigungs- und montagebedingte Unterschiede im Arbeitsverhalten der einzelnen Injektoren auszugleichen. Zur Optimierung ist eine Kalibrierung der Einspritzventile bzgl. der Kraftstoffmenge notwendig. Es ist daher eine Methode erforderlich, die die Soll- und Ist-Kraftstoffmenge entsprechend Gl.(1) abgleicht.

Gl.(1): $|q_{\text{soll}} - q_{\text{ist}}| \rightarrow \min$

Die tatsächlich eingespritzte Menge q_{ist} kann im Motorlauf nicht direkt erfasst werden, steht aber im Zusammenhang mit der Öffnungsdauer T_o des Einspritzventils. Die Autoren möchten daher die Öffnungsdauer aus den Körperschallwellen schätzen, die während des Einspritzvorgangs auftreten. Die Ereignisse des Öffnens sowie des Schließens der Injektordüse sind aus diesen Körperschallwellen zu detektieren. Anhand dieser Schätzung wird das entsprechende Kennfeld im Motorsteuergerät angepasst. Abbildung 1 gibt einen Überblick.

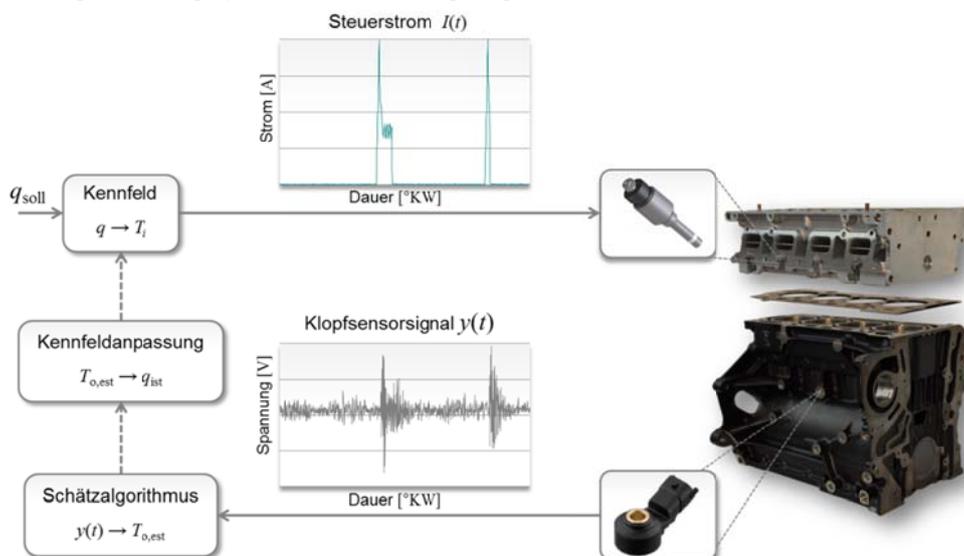


Abbildung 1: Injektorkalibrierung mittels Klopfsensor

Zur Anpassung des Kennfelds im Arbeitspunkt (p, T_i) werden mehrere Nebeneinspritzungen mit Ansteuerdauer T_i beim Kraftstoffdruck p durchgeführt. Aus den aufgezeichneten Klopfensorsignalen werden die Auftrittszeitpunkte des Einspritzbeginns und des Einspritzendes detektiert. Die somit geschätzte Öffnungsdauer $T_{o,est}$ dient zur Kennfeldanpassung. Durch die Verwendung des Klopfensors zur Datenerfassung sind keinerlei konstruktive Änderungen am Aggregat notwendig.

Im Rahmen des Vortrags wird der Vorgang der Kraftstoffeinspritzung diskutiert sowie eine Analyse des emittierten Körperschalls vorgestellt. Auf Basis dieser Betrachtungen werden mehrere Ansätze zur Schätzung der Öffnungsdauer vorgestellt. Die Evaluation der Verfahren erfolgt anhand von Laservibrometrisch erfassten Referenzmessungen des Hubs der Injektornadel.

Adaptive Regelung mechatronischer Fahrwerkssysteme

Guido Koch *

* Lehrstuhl für Regelungstechnik
Technische Universität München
Adresse: Boltzmannstraße 15
85748 Garching
Telefon: 089/289-15663
Fax: 089/289-15653
Email: guido.koch@mytum.de

Boris Lohmann **

** Lehrstuhl für Regelungstechnik
Technische Universität München
Adresse: Boltzmannstraße 15
85748 Garching
Telefon: 089/289-15610
Fax: 089/289-15653
Email: lohmann@tum.de

Schlüsselwörter: Fahrwerksregelung, adaptive Regelung.

Bedingt durch steigende Kundenansprüche müssen Fahrwerke moderner Automobile einen hohen Fahrkomfort bei gleichzeitig hervorragenden Sicherheits- und Handlungseigenschaften bieten. Die Auslegung der Feder- und Dämpferelemente passiver Fahrwerke (Abb. 1 li.) ist jedoch im Hinblick auf diese Aspekte einem Zielkonflikt unterworfen [1]. Bei mechatronischen Fahrwerken kann dieser Zielkonflikt durch Aktuatoren entschärft werden. Dadurch können die Schwingungen des Fahrzeugaufbaus aktiv bedämpft und dynamischen Radlastschwankungen minimiert werden. Jedoch verschiebt sich der Abstimmungskonflikt auf den Reglerentwurf [2].

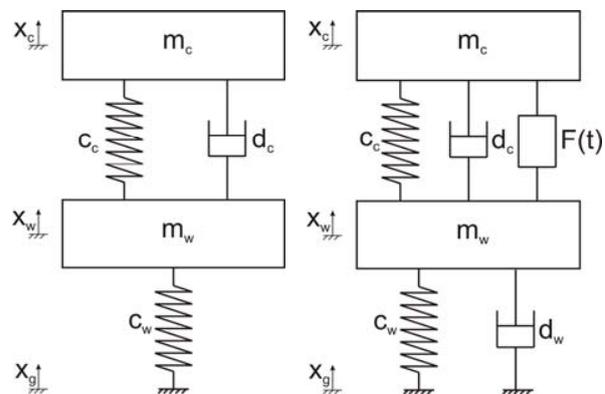


Abbildung 1: Viertelfahrzeugmodelle eines passiven (li.) und eines vollaktiven Fahrwerks.

In diesem Vortrag werden zwei adaptive Vertikaldynamikregelungskonzepte vorgestellt, deren Parametrierungen fahrzustandsabhängig mit Hilfe einer Adaptionlogik angepasst werden. Dadurch wird im Falle sicherheitsunkritischer dynamischer Radlasten und Federwege als primäres Regelziel die Steigerung des Fahrkomforts verfolgt und nur bei Bedarf wird eine fahrsicherheitsorientierte Reglerparametrierung aktiviert.

Zunächst wird die Leistungsfähigkeit adaptiver Fahrwerksregelungskonzepte an einer vollaktiven Fahrwerkskonfiguration (Abb. 1 re.) mit einem elektrischen Linearmotor zwischen Rad- und Aufbaumasse und einer schaltenden Reglerstruktur basierend auf linearen Zustandsreglern (siehe [3]) untersucht. Die Ergebnisse werden anhand von Messungen an einem Viertelfahrzeugprüfstand validiert. Da sich gezeigt hat, dass der adaptive Regelungsansatz zwar ein sehr großes Performancepotential aufweist, jedoch die Anwendbarkeit in modernen Automobilen durch den hohen Energieverbrauch des Aktuators, die komplexe Stabilitätsanalyse und die wenig transparente Reglerparametrierung eingeschränkt ist, wird der Ansatz sowohl in Bezug auf die Aktuatorik als auch auf die Reglerstruktur modifiziert.

Dadurch motiviert wird eine neue mechatronische Fahrwerkskonfiguration (*hybrides Fahrwerk*, Abb. 2 li.) präsentiert, welche durch die Kombination eines semi-aktiven Dämpfers und eines in Reihe zur Primärfeder geschalteten Aktuators mit niedriger Bandbreite charakterisiert ist [4], [5]. Für das hybride Fahrwerk wird ein adaptiver Regelungsansatz vorgestellt, bei dem das optimale dynamische Verhalten des Fahrzeugs von einem adaptiven Referenzmodell vorgegeben wird. Die dadurch resultierende hierarchische Reglerstruktur bestehend aus referenzmodellbasiertem Fahrwerksregler und unterlagerten Aktuatorreglern emuliert das dynamische Verhalten passiver Fahrwerke mit variabler Primärfedersteifigkeit und verstellbarer Dämpfung. Dadurch kann zum einen die Abstimmung des Referenzmodells über die etablierten Abstimmparameter passiver Fahrwerke (Eigenfrequenzen und Dämpfungsmaße) vorgenommen werden und zum anderen durch die Passivitätsbedingungen die Stabilitätsanalyse des adaptiv geregelten Systems deutlich vereinfacht werden [5].

Für die experimentelle Validierung ist die hybride Fahrwerkskonfiguration basierend auf Serienkomponenten moderner Pkw realisiert und auf einem dafür konstruierten Viertelfahrzeugprüfstand (Abb. 2 re.) getestet worden. Die Ergebnisse zeigen, dass das hybride Fahrwerk vergleichbare Performance wie das vollaktive Fahrwerk bei niedrigerem Leistungsbedarf der Aktorik und größerer Transparenz des Konzepts liefert.

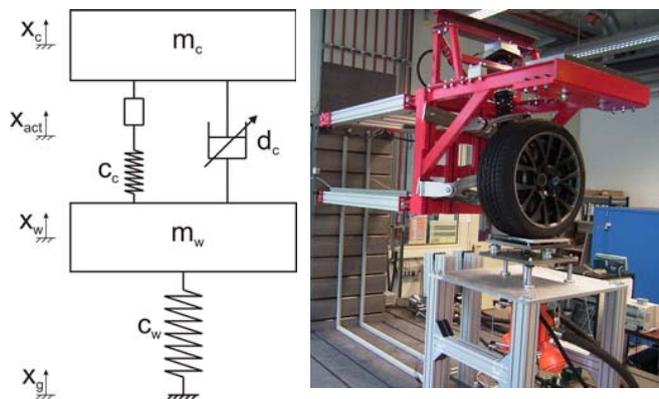


Abbildung 2: Hybride Fahrwerkskonfiguration und Viertelfahrzeugprüfstand

Literatur:

- [1] Mitschke, M. , Wallentowitz, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer, 2004.
- [2] Hrovat, D.: "Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications", *Automatica*, 1997, Vol. 33, pp. 1781-1817.
- [3] Koch, G. , Diepold, K.J. , Lohmann, B.: "Multiobjective road adaptive control of an active suspension system", In: *Motion and Vibration Control - Selected Papers from MOVIC 2008*, Ulbrich, H. und Ginzinger, L. (Hrsg.), pp. 189 - 200, Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [4] Koch, G. , Fritsch, O. , Lohmann, B.: "Potential of low bandwidth active suspension control with continuously variable damper", *Erscheint in Control Engineering Practice*.
- [5] Koch, G. , Spirk, S. , Lohmann, B.: "Reference model based adaptive control of a hybrid suspension system", *Proceedings of the IFAC Symposium Advances in Automotive Control*, 2010.

Konzept eines kognitiven Prüfstands für die Mensch-Maschine-Schnittstelle am Beispiel eines Infotainment-Systems

Asem Eltaher und Markus Maurer

TU Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, 38106 Braunschweig

{eltaher, maurer}@ifr.ing.tu-bs.de

Erfahrene Testingenieure sind oft in der Lage, nach einer interaktiven, manuellen Systemprüfung, selbst bei komplexen Geräten, in relativ kurzer Zeit den technischen Reifegrad des Prüflings treffend zu beurteilen. Dieser Beitrag stellt einen kognitiven Ansatz zum Test der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Kraftfahrzeug vor. Ziel ist es, das „Know How“ solcher erfahrenen Tester in ein Prüfsystem zu übertragen und weiter zu nutzen.

Der Ansatz teilt den Prüfprozess in zwei verschiedene Phasen: In der ersten Phase erlernt das Prüfsystem durch Beobachtung die Teststrategien mehrerer Testingenieure. In der nachfolgenden Planungsphase werden die gelernten Teststrategien miteinander kombiniert und eine neue optimierte Strategie erzeugt. Diese Strategie ist bezüglich Durchführungsaufwand und Testfallabdeckung besser als die zuvor gelernten. Durch Einsatz eines Generalisierungsalgorithmus kann die erzeugte Strategie auch zum Test gleichartiger, in der Lernphase nicht verwendeter Geräte eingesetzt werden. Basierend auf den Ergebnissen der vorhergehenden Schritte kann das Prüfsystem automatische Tests durchführen.

Vorveröffentlichungen zum Thema:

- Eltaher, A.; Maurer, M.; Form, T.; Ayeb, M.: Agents Learn From Human Experts: An Approach To Test Reconfigurable Systems. In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2009, Texas, USA.
- Eltaher, A.; Maurer, M.; Form, T.; Ayeb, M.: How Much Testing Is Enough? A Learning Approach. In Proceedings of the 6th International Conference on Machine Learning and Data Mining, 2009, Leipzig, ISBN 978-3-940501-04-2.
- A. Eltaher: Towards Good Enough Testing: A Cognitive-Oriented Approach Applied to Infotainment Systems. In Proceedings of the 23rd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering, 2008, L'Aquila, Italy.
- A. Eltaher, T. Form, M. Ayeb, and M. Maurer: A Generic Architecture for Hybrid Intelligent Test Systems. In Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Cybernetic Intelligent Systems, 2008, London, United Kingdom.
- A. Eltaher and T. Form: Modeling and Realization of Human-Machine-Interaction as an Approach for a Self-Learning Test System. In Proceedings of the 3rd Conference on 'Simulation und Test in der Funktions- und Softwareentwicklung für Automobilelektronik', 2008, Berlin, Germany.

Abstract

Motivation- Faulty software is costly and possibly life threatening as software products permeate our daily life. Furthermore, business pressures demand a significant reduction in the development time and costs whereas ensuring more robust products. Therefore, the test process is considered as an indispensable component of the development cycle; yet it is an arduous task especially for complex embedded systems.

Problem Statement- Complex embedded systems, e.g. Human-Machine-Interface (HMI) of infotainment or driver assistant systems, are component-based systems that permit new possible configurations of the same Device-Under-Test (DUT). This consequently makes the test process an expensive burden in two diverse aspects: First, given the new delivered configuration, what has to be (re)tested? Second, given the inevitability of faults, when should the testing be stopped?

State of the Art- Recently, various research efforts tend to imitate the human intelligence during test sessions by simulating their decisions using Machine Learning (ML) algorithms. Indeed, ML paradigms play the role to direct the test scenario, based on the past experiences acquired by interviewing human experts, to the most likely defect areas. Later on, empirical studies show that this approach formulates a heavy duty on the interviewed experts. This is due to the necessity to formalize their test strategies using verbal methods, in addition to the mandatory of their periodical engagement during the learning phase.

Approach- In an effort to alleviate the above mentioned difficulties, this ongoing research work aims to enrich the test process with an intuition-based test oracle learned by observing human experts during executing their test scenarios. To this goal, the overall process is divided into two diverse phases, which are learning and testing phases.

In the learning phase, action(s) invoked by the human experts as well as reaction(s) introduced by the DUT are observed, modeled, and stored. This serves the role as a training session for the developed test system, in which it learns effective test scenarios with a significant power of fault revealing.

In the testing phase, diverse test strategies are combined aiming to come out with an optimal one, which is more effective than the strategies learned in terms of the execution time and coverage criterion. Consequently, the rules learned during the training phase would be verified and then generalized using inductive learning algorithms. This would, therefore, enable the test system to manipulate either slightly modified configuration(s) of the same DUT used in the above mentioned learning phase, or other similar DUTs delivered by a third party.

Limitations versus Contributions - On one hand, an intrinsic limitation of this approach is its relatively narrow domain of applicability because it loses a reasonable portion of its effectiveness, if the human factor is not deeply involved in the test process. Furthermore, the test system lacks the power to provide a mathematical-based reason behind its own generated test strategy. This is definitely true since strategies generated by human experts, which are a part of the self-generated strategy, stem from their usage of rules of thumb associated with cognitive heuristics instead of mathematical-based formulas.

On the other hand, this approach offers non-trivial contributions compared with other conventional test systems. For example, it enriches the test processes with a convex combination between automatic test procedures and intuition-based test strategies to maximize individual benefits. Furthermore, learning from human experts would shift a reasonable portion of the workload done by human experts to the test system itself. Consequently, the humans' engagement cost would be reduced leads to a significant reduction in the overall time and cost of the test process; yet its efficiency is not sacrificed.

Nonlinear Model Predictive Control of Fast Systems

Jasem Tamimi und Pu Li
Fachgebiet Simulation und Optimale Prozesse
Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik
Technische Universität Ilmenau
Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau
Tel.: 03677/69-1427(-1423)
E-Mail: {jasem.tamimi; pu.li}@tu-ilmenau.de

Keywords: Optimal control; nonlinear model predictive control; fast systems; stability.

Nonlinear model predictive control (NMPC) has been considered as a promising control algorithm which is based on a real-time solution of a nonlinear dynamic optimization problem [1]. Nonlinear model equations and control as well as state restrictions are treated as equality and inequality constraints of the optimal control problem. However, NMPC has been applied mostly in relatively slow processes until now [2], due to its high computational expense. Therefore, computation time needed for the solution of NMPC leads to a bottleneck in its application to fast systems such as mechanical and/or electrical processes.

In this work, a new solution strategy to efficiently solve NMPC problems is proposed so that it can be applied to fast systems. It is a combination of the multiple shooting and the collocation method. The multiple shooting method is used for discretizing the dynamic model, through which the optimal control problem is converted to a nonlinear programming (NLP) problem. To solve this NLP problem, the values of state variables and their gradients at the end of each shooting need to be computed. We use collocation on finite elements to carry out this task. As a result, the advantages of both the multiple shooting and the collocation method can be employed and therefore the computation efficiency can be considerably enhanced [3].

Our solution approach can be illustrated with the structure as shown in Fig. 1. By using multiple shooting the original nonlinear optimal control problem (NOCP) will be transformed into a NLP problem. Inside each shoot the model equations will be solved on the collocation points to compute the values of state variables and their sensitivities to the controls. These values will be supplied to the NLP solver (usually a sequential quadratic programming (SQP) algorithm) for solving the NLP problem. The performance of the proposed approach is demonstrated with several NMPC problems and the results show it needs a smaller amount of computation time compared with existing NMPC algorithms.

Another important issue of NMPC is the stability analysis of the control system to be realized. Although much work has been done in this area [4, 5], there exists no easy-to-

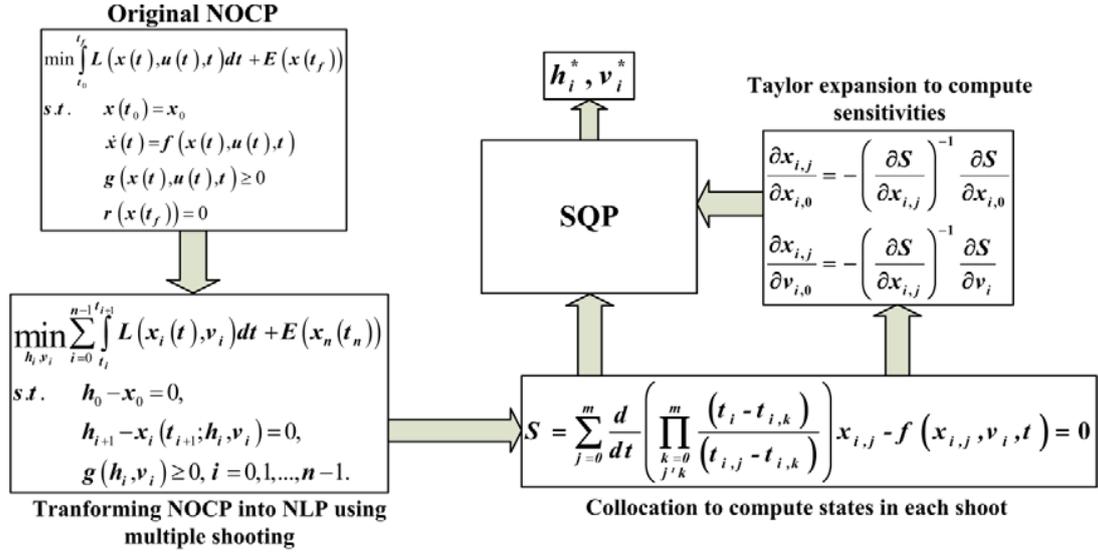


Fig. 1: Proposed approach structure for NMPC

use methods to stabilize NMPC systems. In this work, we propose a new formulation of the optimal control problem to ensure the stability of NMPC systems. The new formulation consists following three features. First, we introduce auxiliary states and linear state equations into the finite horizon dynamic optimization problem. Second, we enforce system states to be contracted with respect to the auxiliary state variables by adding inequality constraints. Thus the stability features of the system states will conform to those of the auxiliary states, i.e. the system states will be stable, if the auxiliary states are stable. Third, the eigenvalues of the linear state equations introduced will be determined to stabilize the auxiliary states and at the same time makes the optimal control problem feasible. This is achieved by considering the eigenvalues as optimization variables in the optimal control problem. Results of NMPC examples will be presented to illustrate the effectiveness of the proposed stabilization approach. Experimental results of using this approach to the control of a laboratory loading bridge will also be presented.

References

- [1] Clarke, D. (1988). Application of generalized predictive control to industrial processes, *IEEE Control Systems Magazine*, 122, 49-55.
- [2] Dua, P. Kouramas, K. Dua, V. and Pistikopoulos, E. (2008). MPC on a chip--Recent advances on the application of multi-parametric model-based control, *Computers and Chemical Engineering*, 32, 754-765.
- [3] Tamimi, J. and Li, P. (2010). A combined approach to nonlinear model predictive control of fast systems, *Journal of Process Control*, 20, 1092-1102.
- [4] Mayne, D. Rawlings, J. Rao, and C. Scokaert, P. (2000). Constrained model predictive control: stability and optimality, *Automatica*, 36, 789-814.
- [5] Chen, H. and Allgoewer, A. (1998). A computationally attractive nonlinear predictive control scheme with guaranteed stability for stable systems, *Journal of Process Control*, 8, 475-485

Modellbasierte Regelung raumluftechnischer Anlagen

Jakob Rehr

Lehrstuhl für Mess- und Regelungssysteme
Institut für Intelligente Systemtechnologien
Alpen-Adria Universität Klagenfurt
Universitätsstraße 65-67, 9020 Klagenfurt
+43(0)463/2700-3573
jakob.rehr@uni-klu.ac.at

Schlüsselwörter: Klimatechnik, Modellbildung, Modellbasierte Regelung

Zur Regelung von raumluftechnischen (RLT) Anlagen, die der Konditionierung von Luft (Temperatur, Feuchte, Druck) dienen, werden üblicherweise PI-Regler eingesetzt. Die experimentelle Einstellung der Reglerparameter erweist sich auf Grund der großen Zeitkonstanten als sehr zeit- und kostenintensiv, die auf diesem Wege erzielbare Regelgüte ist oft nicht zufriedenstellend. Modellbasierte Regelungsstrategien bieten auf Grund ihres systematischen Zugangs entscheidende Vorteile. Der vorliegende Beitrag befasst sich daher mit modellbasierten Regelungskonzepten für klimatechnische Anlagen.

Zentrale Komponenten in einer RLT Anlage sind das Heiz- bzw. das Kühlregister. Dabei handelt es sich jeweils um eine Vielzahl von Kupferrohren, die von einem Wasser-Glykol-Gemisch durchflossen werden. Die zu erwärmende bzw. abzukühlende Luft umströmt die Kupferrohre an der Außenseite, wodurch es zu einer Wärmeübertragung kommt. Für die beiden genannten Komponenten wurde sowohl ein detailliertes Simulationsmodell ermittelt, als auch ein stark vereinfachtes Entwurfsmodell. Das Simulationsmodell basiert auf der Unterteilung der Kupferrohre in einzelne Segmente. Für *ein* solches Segment wird ein konzentriert parametrisches mathematisches Modell erstellt, die einzelnen Segmente werden je nach Aufbau des Registers verschaltet [1]. Das Simulationsmodell dient der Erprobung der Regelgesetze *vor* der Inbetriebnahme an der realen Anlage. Das Entwurfsmodell dient hingegen als Grundlage für den Reglerentwurf. Es handelt sich hierbei ebenfalls um ein konzentriert parametrisches Modell, bei dem auf eine Segmentierung der Kupferrohre verzichtet wird.

Mit Hilfe der mathematischen Modelle können modellbasierte Analyse- und Syntheseverfahren angewandt werden. Beispiele hierfür sind der Nachweis und die Vermeidung unerwünschter Dauerschwingungen in RLT Anlagen [2] sowie der Reglerentwurf mittels exakter Linearisierung. Die Praxistauglichkeit der entwickelten Methoden wird an Hand von experimentellen Ergebnissen, die an einer Versuchsanlage (siehe Abbildung 1) gewonnen wurden, belegt.

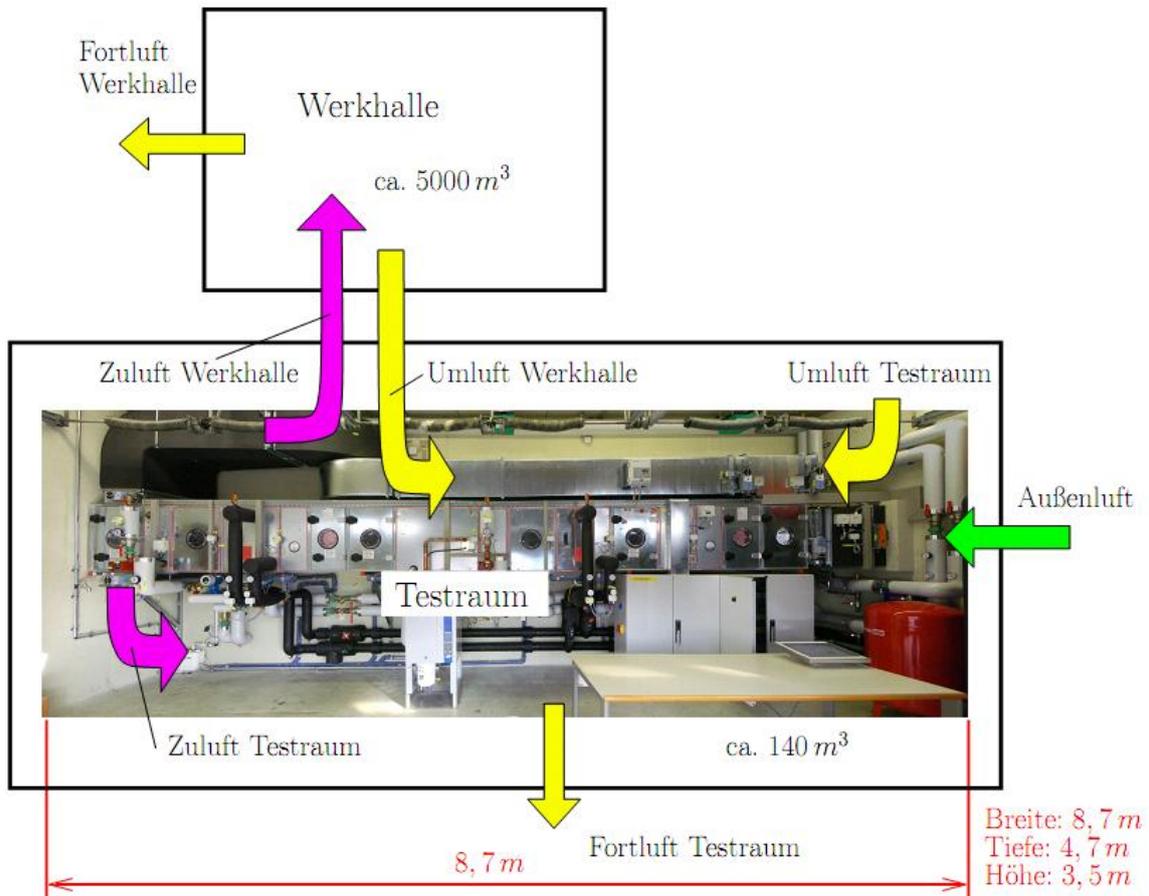


Abbildung 1: Versuchsanlage

Literatur:

- [1] W. Wiening: Zur Modellbildung, Regelung und Steuerung von Wärmeübertragern zum Heizen und Kühlen von Luft. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1987 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 128)
- [2] J. Rehrl und M. Horn: Analyse und Synthese eines Temperaturregelkreises mit Hilfe der harmonischen Balance. at-Automatisierungstechnik 56 (2008) 6, Seite 296-306.

Modellierung des Verdampfungsverhaltens organischer Halbleiter im Hochvakuum

Martin Steinberger

Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik
Technische Universität Graz
Kopernikusgasse 24/II, 8010 Graz, Österreich
Tel.: (+43) 316/873-7023
Fax: (+43) 316/873-7028
E-Mail: martin.steinberger@tugraz.at

Schlüsselwörter: thermische Verdampfung, organische Halbleiter, Effusionszelle

Das Ziel bei der Herstellung organischer elektronischer Bauelemente wie z.B. Dünnschichttransistoren und Leuchtdioden besteht in der Erzeugung von kostengünstigen Bauelementen mit geringem Gewicht, die auch auf flexible Trägermaterialien (z.B. Folien) aufgebracht werden können. Der wesentliche Prozessschritt bei der Fertigung ist hierbei das Aufbringen der aktiven Halbleiterschichten im Hochvakuum.

In Abbildung 1 ist der typische Aufbau einer Beschichtungsanlage dargestellt. Das pulverförmige Verdampfungsgut befindet sich in der so genannten Effusionszelle, die durch eine Widerstandsheizung erwärmt wird. Typische Verdampfungstemperaturen organischer Halbleitermaterialien liegen im Bereich von 100°C bis 500°C . Bei solchen Temperaturen verlässt das verdampfende Material bei geöffneter Zellen-Blende die Effusionszelle, gelangt bei geöffneter Proben-Blende zur Probe und bildet dort die gewünschten Schichten aus.

Diese Schichten sollen vorgegebene Dicken im Bereich zwischen 10 und 100 nm besitzen. Die wesentliche Einflussgröße auf die Qualität der Schichten stellt die Aufdampfrate dar [1,2]. Diese zeitliche Änderung der Schichtdicke während des Aufdampfprozesses liegt meist im Bereich zwischen $0,03 \text{ \AA/s}$ und 4 \AA/s . Die Messung von Schichtdicke und Aufdampfrate erfolgt mit Hilfe zweier Schwingquartz-Mikrowaagen (Punkte 1 und 2 in Abbildung 1).

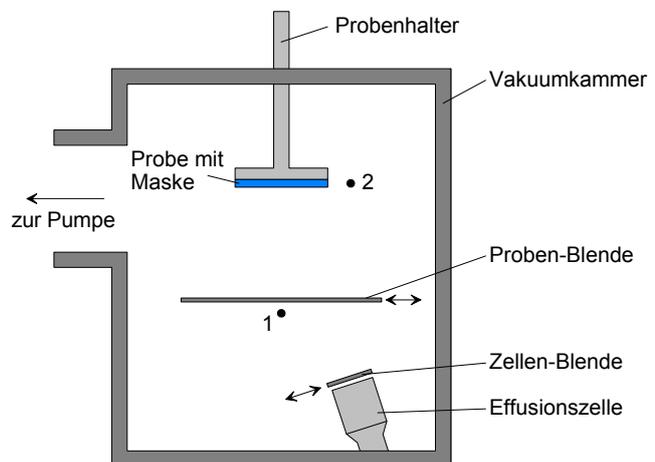


Abbildung 1: Funktionsprinzip der Anlage

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst ein einfaches mathematisches Modell der Beschichtungsanlage, basierend auf der Gleichung von Hertz und Knudsen angegeben [3]. Für dieses, das stationäre Verdampfungsverhalten beschreibende Modell, wird ein einfacher Reglerentwurf durchgeführt und an verschiedenen Verdampfungsmaterialien erprobt.

Für eine bestimmte Klasse von Verdampfungsmaterialien treten mit dieser einfachen Regelung jedoch zu starke Abweichungen zwischen gewünschter und erzielter Aufdampftrate auf. Um dieses Problem zu beseitigen wurde ein Modell des dynamischen Verhaltens der Effusionszelle entwickelt, das in weiterer Folge die Grundlage für einen modellbasierten Reglerentwurf bildet.

Der zentrale Punkt bei der Modellierung ist die Untersuchung des instationären Verdampfungsverhaltens der verwendeten organischen Materialien [4]. Zusätzlich spielen die Wärmeflüsse (Wärmeleitung und Wärmestrahlung) innerhalb der Effusionszelle eine entscheidende Rolle bei der Nachbildung der Beschichtungsanlage. Das resultierende Modell besteht aus zwei gewöhnlichen nichtlinearen Differentialgleichungen erster Ordnung.

Literatur:

- [1] D. Knipp, R.A. Street, A. Völkel, J. Ho: *Pentacene Thin Film Transistors on Inorganic Dielectrics: Morphology, Structural Properties and Electronic Transport*, Journal of Applied Physics, 2003 (93(1)), S. 347-355
- [2] S. Pratontep, M. Brinkmann, F. Nüesch, L. Zuppiroli: *Correlated Growth in Ultrathin Pentacene Films on Silicon Oxide: Effect of Deposition Rate*, Physical Review B, 2004 (69), S. 165201 1-7
- [3] M. Steinberger, M. Horn, A. Fian, G. Jakopic: *Ein einfacher modellbasierter Ansatz zur Regelung der stationären Verdampfung organischer Halbleiter im Hochvakuum*, akzeptiert zur Publikation in: International Journal of Automation Austria
- [4] M. Steinberger, A. Fian, M. Horn, G. Jakopic: *Investigations on the thermal behaviour of evaporation cells for small molecule organic semiconductors*, International Conference on Organic Electronics (Paris), 2010

Vorausschauende probabilistische Sensoreinsatzplanung

Marco Huber

Forschungsgruppe Variable Bildgewinnung und –verarbeitung (VBV)
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 721 6091-406
marco.huber@ieee.org

Schlüsselwörter: Sensoreinsatzplanung, modell-prädiktive Regelung, Kalman-Filter, Branch-and-Bound, konvexe Optimierung

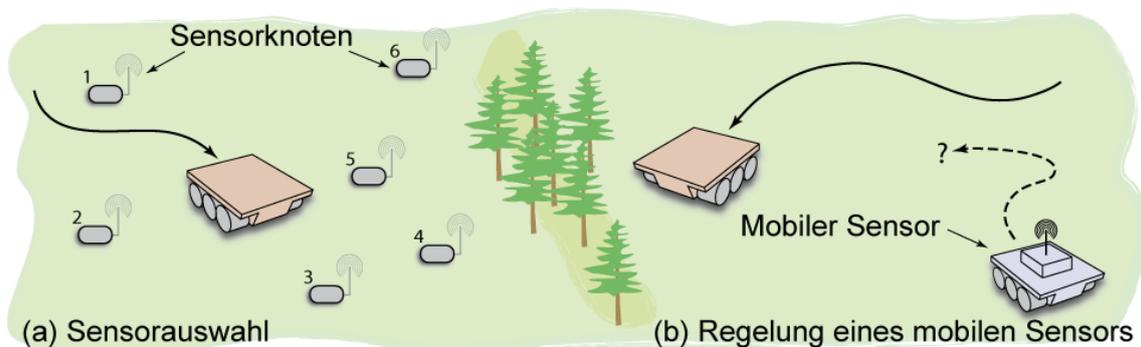


Abbildung 1: (a) Auswahl einer Teilmenge von Sensorknoten in einem Sensornetz und (b) Regelung der Trajektorie eines mobilen Sensors zur schritthaltenden Lokalisierung eines unbekannten, sich bewegendes Objekts (rotes Fahrzeug).

Durch fortschreitende Miniaturisierung, drahtlose Kommunikation sowie modernste Sensortechnologien ist es heutzutage möglich, kleinste Sensorsysteme mit einer Vielzahl an Messmodalitäten aufzubauen. Die Aufgabe der Sensoreinsatzplanung (engl. sensor management) bei derartigen Sensorsystemen ist der gezielte Einsatz der Sensoren und ihrer Modalitäten zur Durchführung von Messungen mit möglichst hohem Informationsgehalt. Beispielhafte Anwendungen der Sensoreinsatzplanung sind in Abbildung 1 dargestellt.

Die gezielte Beeinflussung der Messparameter der verwendeten Sensoren zur Maximierung des Informationsgehalts bzw. Nutzwerts der Messungen erfordert eine vorausschauende Planung, bei welcher das zukünftige Verhalten des beobachteten Objekts miteinbezogen wird. Auf diese Weise lassen sich auch weitergehende Aufgaben, etwa die Reduzierung des Verbrauchs begrenzter Energie- und Rechenressourcen, mittels der Sensoreinsatzplanung behandeln.

Typischerweise ist der interne Objektzustand, etwa die Position und Geschwindigkeit eines Fahrzeugs, nicht direkt zugänglich und Messungen sind aufgrund von Sensorrauschen unsicherheitsbehaftet. Folglich müssen Planungsentscheidungen diesen Unsicherheiten Rechnung tragen, weswegen die Sensoreinsatzplanungsaufgabe in diesem Vortrag als stochastisches Regelungsproblem (engl. stochastic optimal control problem) aufgefasst wird. Im Gegensatz zu vielen verfügbaren Verfahren zur Sensoreinsatzplanung, welche auf spezielle Problemklassen zugeschnitten sind (siehe z. B. [1], [2]), gestattet der vorgestellte Ansatz eine

allgemeine Anwendbarkeit. Hierzu wird von einer nichtlinearen, probabilistischen Modellierung der Objekte und Sensoren sowie von einem kontinuierlichen Zustands- und Messraum ausgegangen. Die Anzahl der Messparameter wird als endlich angenommen. Unter diesen Vorgaben ist eine geschlossene Lösbarkeit der Sensoreinsatzplanungsaufgabe im Allgemeinen nicht gegeben und daher ist eine approximative Herangehensweise erforderlich.

Um zu einer handhabbaren Approximation zu gelangen, sind zwei Maßnahmen für den vorgestellten Ansatz von zentraler Bedeutung: 1. die Planung erfolgt modellprädiktiv über einen bewegten, endlich langen Zeithorizont und 2. wird auf das Antizipieren zukünftiger Messungen innerhalb des bewegten Zeithorizonts verzichtet. Letzteres wird durch prädiktive statistische Linearisierung erreicht, bei welcher die nichtlineare Sensoreinsatzplanungsaufgabe auf eine lineare Planungsaufgabe abgebildet wird. Diese Vorgehensweise entspricht einer Open-Loop-Regelung und demnach erfolgt innerhalb des bewegten Horizonts keine Zustandsrückführung. Dadurch lässt sich, aufgrund der Eigenschaften des Kalman-Filters für lineare Systeme, die optimale Sequenz von Messparametern unabhängig von zukünftigen Messwerten bestimmen.

Trotz beider zuvor beschriebenen Maßnahmen verbietet sich aber eine naive Iteration über alle möglichen Sequenzen, da die Bestimmung der optimalen Sequenz für die verbleibende lineare Planungsaufgabe einem ganzzahligen binären Optimierungsproblem entspricht und somit NP-hart ist [3]. Zur Reduktion des Rechenaufwands werden zwei Strategien vorgestellt. Das erste Verfahren betrachtet die Bestimmung der optimalen Parametersequenz als Baumsuche. Auf der Grundlage einer Abschätzung des Informationsbeitrags bzw. Nutzens von Messparametern können mittels einer Branch-and-Bound-Suchstrategie frühzeitig komplette Teilbäume von der Suche ausgeschlossen werden. Der Erhalt der optimalen Sequenz ist dabei garantiert. Das zweite Verfahren verzichtet auf diese Garantie, erlaubt aber im Gegenzug eine besonders effiziente Bestimmung einer sehr guten Parametersequenz, insbesondere für sehr lange Horizonte und für eine große Anzahl an Messparametern. Hierzu wird das ursprünglich ganzzahlige binäre Optimierungsproblem durch kontinuierliche Relaxation in ein konvexes Optimierungsproblem überführt. Zur Lösung kann dann auf eine Vielzahl ausgereifter Optimierungsverfahren zurückgegriffen werden.

Der vorgestellte Ansatz zur vorausschauenden probabilistischen Sensoreinsatzplanung wird anhand der in Abbildung 1 dargestellten Objektklassifizierungsaufgaben evaluiert.

Literatur:

[1] F. Zhao, J. Shin und J. Reich: Information-Driven Dynamic Sensor Collaboration. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2):61-72, 2002.

[2] V. Gupta, T. H. Chung, B. Hassibi und R. M. Murray: On a Stochastic Sensor Selection Algorithm with Applications in Sensor Scheduling and Sensor Coverage. *Automatica*, 42(2):251-260, 2006.

[3] R. M. Karp: Reducibility Among Combinatorial Problems. *Complexity of Computer Computations*, 85-104, 1972.

Sichere Pfadplanung in dynamischen Umgebungen mittels eines mengenbasierten Global-Dynamic-Window-Ansatzes

Sylvia Horn

* Institut für Automatisierungstechnik
Fakultät für Elektrotechnik und
Informationstechnik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Tel.: +49 351 46332722
Fax: +49 351 46337039
Email: sylvia.horn@tu-dresden.de

Klaus Janschek**

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

Schlüsselwörter: Mengenbasierte Zustandsschätzung, kollisionsfreie Navigation, dynamische Hindernisvermeidung, Robotik.

Zur sicheren, kollisionsfreien Navigation in dynamischen Umgebungen muss ein mobiler Roboter zum einen in der Lage sein, einen seiner Aufgabe entsprechenden Pfad zu generieren und zum anderen möglichen unvorhergesehenen Hindernissen in Echtzeit auszuweichen. Globale Pfadplanungsalgorithmen setzen hier im Allgemeinen bekannte Hindernispositionen voraus, d.h. dynamische Änderungen der Umwelt können nicht berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu arbeiten die Verfahren zur dynamischen Hindernisvermeidung mit aktuell aufgenommenen Messwerten. Dies ermöglicht zwar die Erkennung und Vermeidung von Kollisionen in Echtzeit, jedoch ist bei diesen Algorithmen die Aufgabenerfüllung nicht gewährleistet. Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems stellt hier der GLOBAL DYNAMIC WINDOW APPROACH (GDWA) nach Brock und Khatib [1] dar. Jedoch wird hier, wie bei den meisten Planungsalgorithmen, von idealen Messwerten ausgegangen. Dies widerspricht jedoch dem Ziel sichere und garantiert kollisionsfreie Pfade zu berechnen. Soll diese Anforderung erfüllt werden, müssen die auftretenden Unsicherheiten in den eingesetzten Algorithmen mit berücksichtigt werden.

Dafür kann unter der Voraussetzung, dass die den Unsicherheiten zugrunde liegenden Verteilungen zwar unbekannt, aber begrenzt sind (UBB – **u**nknown **b**ut **b**ounded) ein mengentheoretischer Ansatz [2-5] gewählt werden. In diesem Falle spricht man von der Einschlusssicherheit der geschätzten Zustandswerte, das heißt der wahre Zustandsvektor liegt garantiert innerhalb der aus den fehlerbehafteten Systemgrößen geschätzten Zustandsmenge.

Aus diesem Wissen heraus wurde eine mengenbasierte Adaption des GDWA entwickelt [6]. Das Ziel ist die robuste und garantiert kollisionsfreie Navigation durch eine nur teilweise bekannte, dynamische Umgebung unter Einbeziehung der auftretenden Modell- und Messfehler. Wichtigster Teil ist hier die Berechnung der „erlaubten“ Geschwindigkeiten des Roboters unter Berücksichtigung seiner dynamischen wie kinematischen Beschränkungen. Ausgehend von verrauschten Entfernungsmessungen wird eine Hindernismenge (grau in *Abb. 1*). berechnet. Weiterhin werden alle möglichen Zustandswerte, die der Roboter in den nächsten Zeitschritten einnehmen kann, mengenbasiert geschätzt.

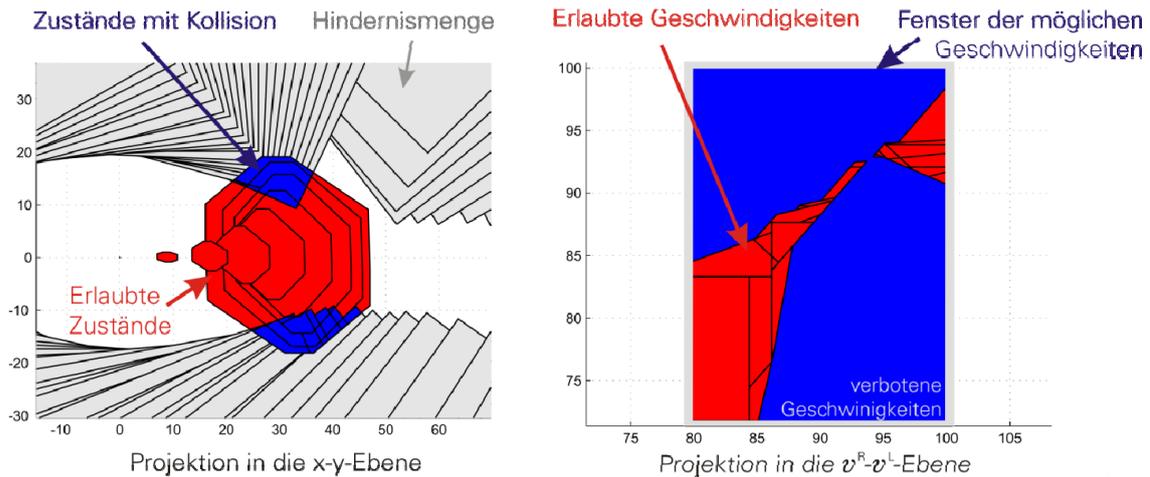


Abb. 1: Berechnung der erlaubten Geschwindigkeiten (links: Projektion der Zustandsmenge in den Ortsraum; rechts: Projektion der Zustandsmenge in den Geschwindigkeitsraum)

Die Schnittmenge zwischen Hindernis- und Zustandsmenge kennzeichnet nun die Zustände, die zu einer Kollision mit einem Hindernis führen (blau in Abb. 1). Erlaubt ist die (nichtkonvexe) Menge aller Zustände, die eine Kollision ausschließen (rot in Abb. 1). Die Wahl des gesuchten Stellbefehls erfolgt anschließend aus der Menge der erlaubten Zustände unter Berücksichtigung eines globalen, optimalen Pfades.

Der vorgestellte Algorithmus wurde in umfangreichen Simulationen getestet. Weitere Experimente auf einer mobilen Plattform mit einem Skid-Steer-Antrieb sind in Vorbereitung.

Literatur:

- [1] O. Brock and O. Khatib. High-speed navigation using the global dynamic window approach. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1: 341-346, 1999.
- [2] F. C. Scheppe. Recursive state estimation: unknown but bounded errors and system inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-13(1): 22-28, 1968.
- [3] L. Chisci, A. Garulli and G. Zappa. Recursive state bounding by parallelotopes. *Automatica*, 32: 1049-1055, 1996.
- [4] S. Horn and K. Janschek. Ein Multimodellansatz zur mengenbasierten Zustandsschätzung von dynamischen Systemen. In: *Tagungsband zum 15. Steirisches Seminar für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung*, 2007.
- [5] L. Jaulin. Nonlinear bounded-error state estimation of continuous-time systems. *Automatica*, 38: 1079-1082, 2002.
- [6] S. Horn and K. Janschek. A set-based global dynamic window algorithm for robust and safe mobile robot path planning. In: *Proceedings for the Joint Conference of ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, 2010.

Optimale Trajektorienplanung für Automobile

Julius Ziegler

Christoph Stiller

Institut für Mess- und Regelungstechnik (MRT)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Engler-Bunte-Ring 21

76131 Karlsruhe

julius.ziegler@kit.edu

Schlüsselwörter: Trajektorienplanung, Optimalsteuerung, autonomes Fahren

Die Trajektorienplanung für ein Automobil kann als Optimalsteuerungsproblem aufgefasst werden. Sie ist vor allem aus zwei Gründen schwierig: Erstens ist das System nichtholonomen Zwangsbedingungen unterworfen, auch solchen, die sich nur differenziell, also als Gleichung zwischen den Geschwindigkeiten, ausdrücken lassen. Zweitens weist das Problem sowohl durch die Restriktion durch Hindernisse, als auch durch die Notwendigkeit, gegebenenfalls vorwärts und rückwärts zu manövrieren, kombinatorische Aspekte auf (Abbildung 1). Wir schlagen deshalb eine kombinatorische Methode vor, die auf einer strikten Diskretisierung des Arbeitsraums beruht. Es wird ein Funktional minimiert, das die ersten zwei Ableitungen der Trajektorie enthält. So können beispielsweise die beim Durchfahren auftretenden Beschleunigungen minimiert werden, was sowohl fahrdynamisch als auch in Bezug auf den Komfort der Insassen vorteilhaft ist. Wir zeigen, dass das Problem in seiner diskreten Formulierung auf eine Graphsuche reduziert werden kann. Die Ableitungen werden dabei durch finite Differenzen angenähert. Die erzeugten Trajektorien sind, bis auf Diskretisierungsartefakte, im beschriebenen Sinne optimal, und genügen nichtholonomen, differenziellen Zwangsbedingungen bis zu zweiter Ordnung. Das Verfahren wurde auf einem zum autonomen Fahren ausgerüsteten VW Passat erfolgreich implementiert und getestet.



Abbildung 1: Beispieltrajektorien
Das Verfahren wurde auf einem zum autonomen Fahren ausgerüsteten VW Passat erfolgreich implementiert und getestet.

Modell-basierte Teleoperation¹

Carolina Passenberg

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik
 (Ordinarius: Univ.-Prof. Dr.-Ing./Univ. Tokio Martin Buss)
 Technische Universität München
 Arcisstr. 21 - 80333 München
 Tel.: 089/289-28396 Fax: 089/289-28340
 cpassenberg@lrsr.ei.tum.de www.lrsr.ei.tum.de

Schlüsselwörter: Teleoperation, Haptik

Haptische Telepräsenzsysteme ermöglichen einem oder mehreren Benutzer/n Manipulationsaufgaben in einer entfernten Umgebung durchzuführen und über die Interaktion zwischen Roboter und entfernter Umgebung haptische Rückmeldung zu erhalten, siehe Abbildung 1. Zwei der wichtigsten, aber gegensätzlichen Regelziele

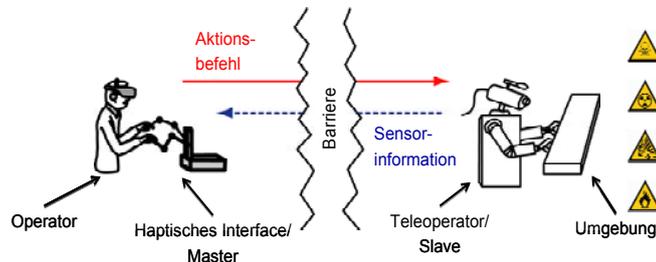


Abbildung 1: Haptisches Single-User Telepräsenzsystem

für Telepräsenzsysteme sind *robuste Stabilität* und *Transparenz*.

Eine Möglichkeit beide Regelziele zu optimieren besteht in der Einbeziehung von kontinuierlich aktualisiertem Modellwissen über den Operator, die entfernte Umgebung oder die durchzuführende Aufgabe im Reglerentwurf. Eine Übersicht bestehender Ansätze in der Literatur findet sich in unserem Übersichtsartikel [1]. Ein Ansatz, der besonders in den letzten beiden Jahren an Bedeutung gewinnt, ist die sogenannte *Modell-basierte Teleoperation*, die erstmals von Blake Hannaford 1989 vorgestellt wurde [2] und in [3-4] erweitert wurde.

Bei diesem Ansatz werden anstelle von haptischen Signalen wie Kräften und

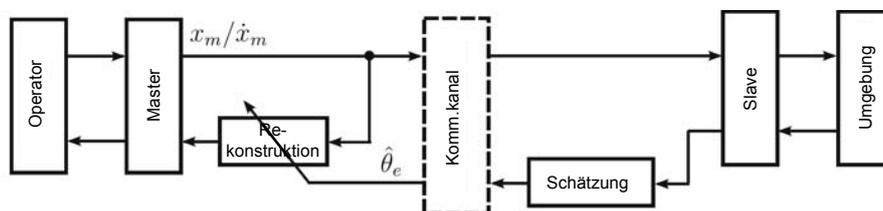


Abbildung 2: Modell-basierte Teleoperation von entfernter zu lokaler Seite für Single-User Systeme

Positionen geschätzte Modelle von Umgebung und/oder Operator auf die jeweils andere Seite übertragen und dort lokal simuliert, siehe Abbildung 2.

¹ Diese Arbeit wurde teilweise im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 453 „Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

Die Vorteile dieses Ansatzes liegen in einer lokalen und damit unverzögerten haptischen Darstellung ohne Beeinträchtigung der Stabilität durch Unsicherheiten im Kommunikationskanal, wodurch ein quantitativ und qualitativ hochwertiges Telepräsenzsystem erzielt werden kann. Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist die Auswahl eines passenden Modells und eine schnelle und genaue Schätzung der Modelleigenschaften.

Im Rahmen unserer Forschungsarbeiten wurde der Ansatz Modell-basierter Teleoperation aufgegriffen und in mehrere Richtungen erweitert. Zunächst wurde ein System mit Zeitverzögerung entwickelt, in dem ein Umgebungs- und ein Operatormodell kombiniert wurden, um sowohl einen stabilen Kontakt mit entfernten Objekten zu garantieren als auch einen hochwertigen haptischen Eindruck von Kontaktsituationen zu vermitteln [6]. In einem weiteren Schritt wurde Modell-basierte Teleoperation für Punktkontakte erstmalig auf 6 Freiheitsgrade erweitert. Der entwickelte Ansatz wurde u.a. in Kooperation mit KUKA GmbH an einem Telepräsenzsystem mit Zeitverzögerung getestet.

Darüber hinaus wurde der Ansatz Modell-basierter Teleoperation auf Multi-User Systeme übertragen. Die Operatoren werden hierbei über ein lokales Modell des manipulierten Objektes virtuell miteinander gekoppelt, wodurch die physikalische Kopplung über die Teleoperatoren auf der entfernten Seite vermieden wird.

Theoretische und experimentelle Ergebnisse zu allen drei Ansätzen zeigen, dass Modell-basierte Teleoperation im Vergleich zu einem nicht-adaptierenden Ansatz eine stabile Interaktion mit verbesserten Transparenzeigenschaften ermöglicht.

Zusammenfassend gibt dieser Vortrag einen Einblick in eine Regelungsarchitektur für Telepräsenzsysteme, die über den klassischen bilateralen Austausch von haptischen Signalen hinaus geht um dem Ziel eines robust stabilen und transparenten Systems näher zu kommen.

Literatur:

- [1] C. Passenberg, A. Peer, M. Buss, "A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for teleoperation systems." *Journal of Mechatronics*, DOI 10.1016/j.mechatronics.2010.04.005, 2010.
- [2] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinaesthetic feedback," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, pp. 426–434, 1989.
- [3] P. Mitra and G. Niemeyer, "Model-mediated Telemanipulation," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 27, pp. 253–262, 2008.
- [4] S. Clarke, G. Schillhuber, M. F. Zaeh, and H. Ulbrich, "Prediction-based methods for teleoperation across delayed networks," *Multimedia Systems*, vol. 13, pp. 253–261, 2008.
- [5] C. Weber, V. Nitsch, U. Unterhinninghofen, B. Färber, and M. Buss, "Position and force augmentation in a telepresence system and their effects on perceived realism," in *WorldHaptics*, pp. 226–231, 2009.
- [6] A. Achhammer, C. Weber, A. Peer, and M. Buss, "Improvement of model-mediated teleoperation using a new hybrid environment estimation technique," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5358–5363, 2010.
- [7] C. Passenberg, A. Peer, M. Buss, "Model-Mediated Teleoperation for Multi-Operator Multi-Robot Systems", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4263–4268, 2010.

Synchronisierung heterogener linearer Systeme

Kim D. Listmann *

* Institut für Automatisierungstechnik, FG Regelungstheorie & Robotik
Technische Universität Darmstadt
Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt
Tel. : +49 – (0)6151 – 16 5442
Fax : +49 – (0)6151 – 16 2507
klistman@rtr.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: Synchronisierung, heterogene Systeme, dynamische Ausgangerückführung, internes Modell

Die Beobachtung, dass zwei an der selben Wand aufgehängte Pendeluhren ihre Schwingungsphasen synchronisieren, die Christiaan Huygens im 17. Jahrhundert machte, ist in zweierlei Hinsicht bemerkenswert: Erstens wird die Gleichphasigkeit erreicht obwohl die Pendeluhren nicht direkt, sondern nur über die Wand gekoppelt sind. Zweitens sind die beiden Pendeluhren, durch Fertigungsungenauigkeiten, eigentlich nicht identisch. Das Ergebnis ist noch einmal in Abbildung 1 dargestellt.

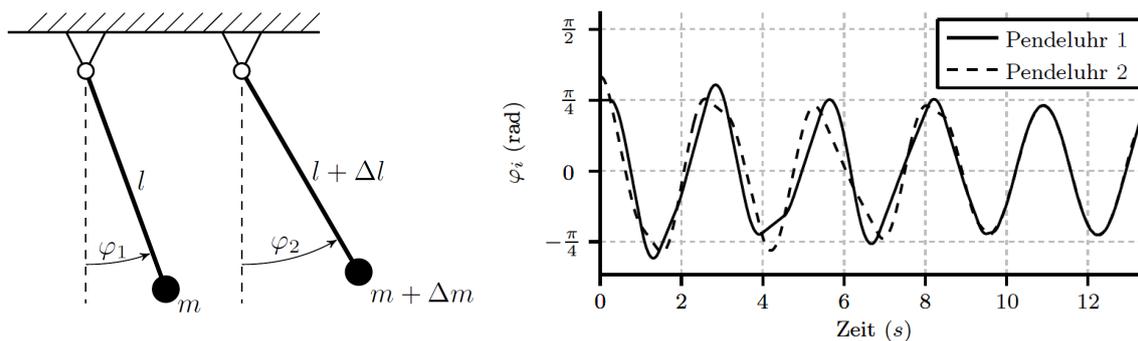


Abbildung 1: Darstellung der Pendeluhren und ihres zeitlichen Schwingungsverlaufs

Nachdem in den letzten zehn Jahren vor allem die Synchronisierung identischer, also homogener, dynamischer Systeme betrachtet wurde (siehe z.B. [3]), müssen die erhaltenen Ergebnisse für den Fall unterschiedlicher, also heterogener, dynamischer Systeme noch einmal überdacht werden. Aus Sicht der Anwendung ist dies offensichtlich notwendig, da kein technisches System exakt identisch sein kann.

Vor kurzem wurde dazu in [1] und [2] festgestellt, dass auf Basis eines gemeinsamen und identischen internen Modells eine Synchronisierung der Systeme möglich ist. Dies ist einleuchtend und für den Fall der Pendeluhren gegeben durch die Dynamik des Winkels. Die Ableitung dieses Zustands ergibt sich direkt durch die Winkelgeschwindigkeit und zwar für beide Pendeluhren. Außerdem unterscheidet sich die Gesamtdynamik beider Pendeluhren nur innerhalb der Parameter des Modells. Es treten keine strukturellen Unterschiede in der Zustandsraumbeschreibung auf. Diese Systeme möchten wir als quasi-homogene Systeme bezeichnen. In ihrem Fall wird es immer möglich sein, den gesamten Zustand zu synchronisieren.

Einen Spezialfall stellen Systeme mit stochastischen Störsignalen dar, die durch Modellierungs- und Sensorungenauigkeiten entstehen. Hierfür wird der Entwurf mittels eines angepassten Kalman-Filters durchführbar.

Für allgemeine heterogene dynamische Systeme wird dies nicht gelten. Deshalb gilt es, bevor überhaupt über Methoden zur Synchronisierung gesprochen werden kann, herauszufinden, für wie viele und welche Zustände Synchronisierung möglich ist. Dazu wird in dieser Arbeit der "Constraint Dynamics Algorithm" [4] verwendet, der es erlaubt den maximalen invarianten Unterraum eines Systems anzugeben. Daraus ergibt sich direkt, die maximale Anzahl der synchronisierbaren Zustände eines heterogenen Multi-Agenten Systems. Ausgehend von dieser Dimension wird dann eine allgemeine dynamische Ausgangsrückführung vorgestellt, die in der Lage ist, ein gemeinsames internes Modell nur unter Verwendung von lokal verfügbarer, d.h. mit den Nachbarn im Netzwerk kommunizierter, Information in der Gesamtdynamik zu erzeugen. Dies stellt eine Erweiterung der Verfahren in [5] dar und führt zur Synchronisierung eben jener ausgewählter Zustände.

Die Frage, für welche Zustände eine Synchronisierung physikalisch sinnvoll ist, kann dabei nicht beantwortet werden, da prinzipiell für alle Zustandskombinationen ein internes Modell dieser gegebenen Dimension generiert werden kann. So bleibt die endgültige Festlegung dem Anwender überlassen; er sollte entscheiden können für welche Zustände Synchronisierung wirklich Sinn macht (vgl. Abbildung 2). Im hier dargestellten Fall können dies nur die Position und Orientierung in der Ebene, nicht aber die Höhe, Nickwinkel oder der Rollwinkel sein.



Abbildung 2: Heterogenes Roboterteam

Literatur:

- [1] P. Wieland und F. Allgöwer. An Internal Model Principle for Consensus in Heterogeneous Linear Multi-Agent Systems. *Proc. of the 1st IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems*, S. 7 – 12, 2009.
- [2] P. Wieland und F. Allgöwer. An Internal Model Principle for Synchronization. *Proc. of the 7th IEEE International Conference on Control and Automation*, S. 285 – 290, 2009.
- [3] R. Olfati-Saber, J. A. Fax und R. M. Murray. Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. *Proceedings of the IEEE*, 95(1): 215 – 233, 2007.
- [4] H. Nijmeijer und A. van der Schaft. *Nonlinear Dynamical Control Systems*. Springer, 1990.
- [5] K. D. Listmann. Synchronisierung linearer Systeme. *Workshop des VDI/VDE GMA FA 1.40 „Theoretische Verfahren der Regelungstechnik“*, Salzburg, 2010.

Kognitive und robuste Stabilisierung einer Klasse nichtlinearer Systeme ohne vorausgesetzte Modellkenntnis

Fan Zhang*

* Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik
Universität Duisburg-Essen
Adresse: MB 345 - Lotharstr. 1-21
47057 Duisburg
Telefon: 0203-379 2591
Fax: 0203-379 3027
E-Mail: fan.zhang@uni-due.de

Dirk Söffker**

** Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik
Universität Duisburg-Essen
Adresse: MB 341 - Lotharstr. 1-21
47057 Duisburg
Telefon: 0203-379 3429
Fax: 0203-379 3027
E-Mail: soeffker@uni-due.de

Schlüsselwörter: Stabilität, robuste Regelung, Kognition, Wissensdatenbank

In diesem Beitrag wird eine auf einer kognitiven Architektur basierende, neue und robuste Regelungsmethode vorgestellt. Das Ziel des Regelungsansatzes ist die Stabilisierung einer Klasse unbekannter, nichtlinearer dynamischer Systeme.

Die vorgestellte kognitive Architektur basiert auf modularen Algorithmen sowie der laufenden Auswertung der Interaktion zwischen einem als Agenten aufgefassten Regler und dessen externer Umgebung, dem zu regelnden System. Die kognitive Architektur erfasst zunächst die Systemdynamik und erzeugt geeignete Aktionen (Stellgrößen). Der Ansatz ist als kognitiver Ansatz zu klassifizieren, weil er die Dynamik des zu regelnden Systems auf Basis einer internen Wissensrepräsentation abbildet und hierauf basierend kognitive Funktionen und Prozeduren zur Realisierung von Stellgrößen benutzt. Im Kern basiert der vorgeschlagene Ansatz auf drei Modulen: einer ziel- und anwendungsspezifischen Datenbank, welche im konkreten Fall beispielsweise allgemeines Wissen zur Stabilität dynamischer Systeme beschreibt, sowie zwei neuronalen Netzen, wobei eines die aktuelle Systemdynamik geeignet repräsentiert und das andere bezüglich der Regelungsfunktion des Eingangssignals, und denen interne Beziehungen wie sie ausgangsseitig gemessen werden, abbildet und interpretiert. Die vorgeschlagene Methode benötigt nur die Messungen der Systemzustände zur Stabilisierung eines Systems; es sind keine weiteren strukturellen oder parametrische Informationen erforderlich.

Abschließend wird die vorgestellte Methode anhand eines numerischen Beispiels zur Stabilisierung eines aeroelastischen Systems erläutert, die erzielbaren Ergebnisse werden vergleichend an Hand von Simulationsergebnissen vorgestellt.

Literatur:

[1] F. Zhang and D. Söffker: *Quadratic Stabilization of a Nonlinear Aeroelastic System Using a Novel Neural-Network-Based Controller*. Science in China Series E: Technological Sciences, accepted.

[2] F. Zhang and D. Söffker: *Online quadratic stability judgement of unknown nonlinear discrete-time systems: a data-driven method*, to appear.

Klassifikationsgestützte Adaption eines robusten nichtlinearen Beobachters zur Fehlerdiagnose

Patrick Gerland

Mess- und Regelungstechnik
Fachbereich Maschinenbau
Universität Kassel
Mönchebergstr. 7, 34125 Kassel
Tel.: +49 (0) 561 804 2849
Fax: +49 (0) 561 804 2847
E-Mail: patrick.gerland@mrt.uni-kassel.de

Andreas Kroll

Mess- und Regelungstechnik
Fachbereich Maschinenbau
Universität Kassel
Mönchebergstr. 7, 34125 Kassel
Tel.: +49 (0) 561 804 3248
Fax: +49 (0) 561 804 2847
E-Mail: andreas.kroll@mrt.uni-kassel.de

Schlüsselwörter: Modellbasierte Fehlerdiagnose, nichtlinearer robuster Beobachter, Klassifikation, Schwellwertadaption

Mit zunehmenden Anforderungen an die Funktionalität, Effizienz und Sicherheit neuer technischer Systeme wird eine zuverlässige Überwachung und Fehlerdiagnose immer wichtiger. Diese Anforderung kann signalgestützt, z. B. durch Grenzwertüberwachung oder Signalanalyse, oder auch modellbasiert erfolgen. Dabei lassen sich beobachterbasierte Verfahren, Verfahren zur Parameterschätzung und Verfahren auf Basis von Paritätsgleichungen unterscheiden.

Eine exemplarische Anwendung aus der industriellen Praxis stellt die Überwachung wichtiger Sensoren am hydrostatischen Getriebe mobiler Arbeitsmaschinen dar. Hierbei repräsentieren signalgestützte Verfahren derzeit noch den Stand der Technik. Eine erfolgversprechende Alternative zur Steigerung der Qualität der Überwachung ist die beobachterbasierte Fehlerdiagnose. Wesentliche Schwierigkeiten resultieren jedoch aus der stark nichtlinearen Dynamik hydrostatischer Fahrtriebe [1]. Daneben stellen Leckverluste im hydraulischen Kreis sowie der Einfluß externer Lasten durch die Umwelt große Unsicherheiten bei der Modellbildung dar, wobei diese zudem von der aktuellen Betriebsphase abhängen und sich daher i.d.R. stark ändern.

Für Systeme mit Unsicherheiten eignen sich besonders Beobachter vom Sliding-Mode-Typ (SM). Dazu schlagen Edwards et al. in [2] einen Fehlerdetektions- und Identifikationsansatz (FDI) vor. Dieser Ansatz erlaubt sowohl eine Aktor- als auch Sensorfehlerdetektion. Allerdings basiert der Beobachterentwurf in [2] auf einem linearen Streckenmodell, wodurch bei der Anwendung auf nichtlineare Systeme eine verringerte Fehlersensitivität resultiert. Erweiterungen dieses Ansatzes auf eine ausgewählte nichtlineare Systemklasse sind bekannt [3], der Ansatz erlaubt jedoch nur die Aktorfehlerdetektion. Einen weiteren nichtlinearen Beobachertyp stellen Takagi-Sugeno- (TS) Fuzzy-Beobachter dar [4]. Allerdings ist dieser Beobachertyp nur bedingt robust gegenüber Modellparameterunsicherheiten.

In diesem Beitrag wird eine Kombination des FDI-Ansatzes nach [2] mit dem TS-Beobachter nach [4] präsentiert. Dies liefert eine Methode zur Aktor- und Sensorfehlerdiagnose für eine Klasse nichtlinearer unsicherer Systeme. Gegenüber anderen Ansätzen erlaubt dies eine quantitative Bestimmung oder sogar exakte Rekonstruktion des Fehlersignalverlaufs. Darüber hinaus ermöglicht der Ansatz die Berechnung kon-

stanter Fehlerschwellen direkt aus dem physikalischen Vorwissen über das betrachtete System. Durch eine Erweiterung um eine Betriebsphasenerkennung wird es möglich, die Schwellenwerte des FDI-Ansatzes on-line an die aktuelle Betriebsphase anzupassen (vgl. Abbildung 1). Hierdurch ergibt sich in Betriebsphasen mit geringen Modellunsicherheiten eine deutlich erhöhte Fehlersensitivität. In Betriebsphasen mit großen Modellunsicherheiten werden Fehlalarme vermieden. Die Kernidee besteht darin, die aktuelle Betriebsphase mittels eines Bayes-Klassifikators zu ermitteln und darüber die Fehlerschwellen an die a-priori definierten Unsicherheiten der unterschiedlichen Betriebsphasen anzupassen. Die Effektivität des vorgeschlagenen Ansatzes wird anhand einer umfangreichen Simulation einer mobilen Arbeitsmaschine demonstriert.

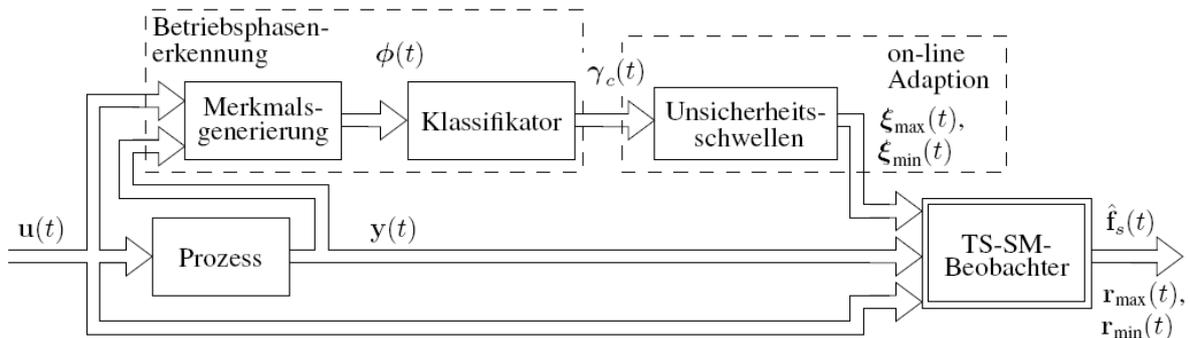


Abbildung 1: TS-SM-Beobachter mit klassifikationsgestützter Adaption der Fehlersensitivität des TS-SM-Beobachters.

Literatur:

- [1] H. Schulte: Control-Oriented Modeling of Hydrostatic Transmissions using Takagi-Sugeno Fuzzy Systems. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 23-26 Juli 2007, London, UK, S. 2030-2035.
- [2] C. Edwards, S.K. Spurgeon, R.J. Patton: Sliding mode observers for fault detection and isolation. *Automatica*, 36(4), 2000, S. 541-553.
- [3] X.G. Yan, C. Edwards: Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer. *Automatica*, 43(9), 2007, S. 1605-1614.
- [4] K. Tanaka, H.O. Wang: *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*. J. Wiley & Sons, 2001.

Kalman-Filterung: Schätzung der Rauschkovarianzmatrizen mit garantierter positiver Definitheit

Martin Tiefenbacher

Institut f. Mechanik u. Mechatronik
TU Wien
Wiedner Hauptstraße 8-10, A-1040
Tel.: +43-(0)1-58801-32823
Fax.: +43-(0)1-58801-32899

martin.tiefenbacher@tuwien.ac.at

Stefan Jakubek

Institut f. Mechanik u. Mechatronik
TU Wien
Wiedner Hauptstraße 8-10, A-1040
Tel.: +43-(0)1-58801-32810
Fax.: +43-(0)1-58801-32899

stefan.jakubek@tuwien.ac.at

Schlüsselwörter: Kalman-Filterung, Parameterschätzung, Semi-definite Nebenbedingung, Kovarianzschätzung

Eine in der Praxis häufig vorkommende Aufgabenstellung ist die Bestimmung der stationären Prozess- und Messrauschkovarianzmatrizen eines linearen zeitinvarianten Systems zur Auslegung des Kalman-Filters. Zumeist werden in der Praxis weder spezielle Messungen zur Bestimmungen der Rauschkovarianzen durchgeführt, noch ist die Eingangsmatrix der Rauscheingänge bekannt. Um die Kovarianzmatrizen hinsichtlich einer optimalen Zustandsbeobachtung bestmöglich zu bestimmen, werden diese auf Basis der Autokovarianz des Ausgangs mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate geschätzt [1, 2, 3]. Die damit zusammenhängenden Probleme der positiven Definitheit der geschätzten Kovarianzmatrizen können nur im Falle von unkorrelierten Eingängen mittels linearer Matrixungleichungen gelöst werden [4].

Da die Kovarianzmatrizen im Allgemeinen nicht von diagonaler Form sind, führt die Bedingung der positiven Definitheit der Kovarianzmatrizen zu einer nichtlinearen Nebenbedingung. Neben der bekannten Methode, welche das Gütefunktional durch eine logarithmische *Barrier*-Funktion erweitert [5], wird im Vortrag ein neuer Zugang vorgestellt, der durch Linearisierung der nichtlinearen Nebenbedingung das ursprüngliche Problem in ein *Least-Squares* Problem mit linearen Matrixungleichungen als Nebenbedingung überführt. Die Linearisierung mittels Variationsrechnung ermöglicht zusätzlich eine Regularisierung, welche optimal bezüglich der Frobenius-Norm der Eigenvektoränderung ist. Die vorgestellte Methode zur Identifikation von realisierbaren Kovarianzmatrizen ist gleichermaßen für unbeobachtete und beobachtete Systeme anwendbar.

Die vorgestellte Methode basiert auf speziellen positiv definiten Ansatzmatrizen, welche durch die Vektoren der Standardbasis und der linearen Kombination von jeweils zwei dieser Vektoren aufgespannt wird. Dadurch kann jede symmetrische Matrix eindeutig abgebildet werden und gegebenenfalls das a-priori Wissen durch Verwendung einer Teilmenge aus dem vollständigen Satz der Basismatrizen genutzt werden. Der Regressor bildet sich im stationären Fall aus den Lyapunov-Lösungen des Systems mit den jeweiligen Basismatrizen als Eingang. In Anbetracht der Existenz der Lösung muss bei nicht asymptotisch stabilen Systemen eine initiale Kalmanverstärkung gewählt werden, die das System asymptotisch stabilisiert, und man muss in der Folge die Auswertung mittels beobachtetem System durchführen. Infolge der Linearisierung der nichtlinearen Nebenbedingung erfolgt die Lösung iterativ, wobei mittels einer linearen Matrixungleichung eine verbesserte initiale Schätzung erreicht wird.

Die Schätzung der Kovarianzmatrizen wird anhand eines Beispiels mittels Monte-Carlo Simulation gezeigt. Die Ergebnisse verdeutlichen die verbesserte Schätzung der Kovarianzmatrizen unter Einhaltung der Nebenbedingung.

Literatur:

- [1] R.K. Mehra. On the identification of variances and adaptive kalman filtering. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1970.
- [2] R.K. Mehra. Approaches to adaptive filtering. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1972.
- [3] P.R. Belanger. Estimation of noise covariance matrices for a linear time-varying stochastic process. *Automatica*, 1974.
- [4] S. Boyd and L.Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [5] B.J. Odelson, M.R. Rajamani, and J.B. Rawlings. A new autocovariance least-squares method for estimating noise covariances. *Automatica*, 2006.

Parameteridentifikation für zeitkontinuierliche Systeme mit Hilfe signalmodellgenerierter Modulationsfunktionen

Christian Schmid *

* Lehrstuhl für Regelungstechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstr. 7, 91058 Erlangen
09131 / 8527462
09131 / 8528715

christian.schmid@rt.eei.uni-erlangen.de

Günter Roppenecker**

** Lehrstuhl für Regelungstechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstr. 7, 91058 Erlangen
09131 / 8527127
09131 / 8528715

guenter.roppenecker@rt.eei.uni-erlangen.de

Schlüsselwörter: Parameteridentifikation, Modulationsfunktionen, Signalmodell

In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur Parameteridentifikation für zeitkontinuierliche Systeme betrachtet, das auf der Verwendung von Modulationsfunktionen basiert. Diese von Shinbrot in [1] eingeführte Vorgehensweise besitzt den Vorteil, die gesuchten Parameter in endlicher Zeit bestimmen zu können, ohne dafür zeitliche Ableitungen von Messgrößen oder deren Anfangswerte kennen zu müssen. Dem stand bisher nachteilig gegenüber, dass für die konkrete Wahl einer Modulationsfunktion kaum Anhaltspunkte existierten. Im schlimmsten Fall kann sogar die Identifizierbarkeit der gesuchten Parameter bei Verwendung einer ungeeigneten Modulationsfunktion verloren gehen (siehe [2]).

Zur Behebung dieser Sachverhalte wird im Rahmen des Vortrags ein neuer Ansatz zur systematischen Konstruktion einer Modulationsfunktion durch Anpassung an die verwendeten Zeitsignale vorgestellt. Dies geschieht mit Hilfe eines linearen zeitvarianten Signalmodells, das derart definiert wird, dass sämtliche Anforderungen an die Modulationsfunktion in Anfangs- und Endbedingungen für die Zustände des Signalmodells umformuliert werden können. Dies hat zur Folge, dass ein Zwei-Punkt-Randwertproblem für das lineare zeitvariante Signalmodell gelöst werden muss, um die Modulationsfunktion zu bestimmen. Es wird gezeigt, wie sich mittels eines Steuerungsentwurfs eine geschlossene Lösung des Zwei-Punkt-Randwertproblems bestimmen lässt, wobei zur Berechnung der Steuerung aufgrund der besonderen Eigenschaften des Signalmodells bekannte Methoden der Theorie zeitvarianter Systeme herangezogen werden können (siehe z.B. [3], [4]).

Literatur:

- [1] Shinbrot, M.: „*On the analysis of linear and nonlinear systems from transient response data*“, NACA Rep. No. TN 3288, 1954.
- [2] Kraus, F.J.; Senning, M.F.: „*Signal adapted modulation functions for identification of linear continuous time systems*“, Proc. 10th IFAC World Congress, Munich, Germany, pp. 245-250, 1987.
- [3] Unbehauen, R.: „*Systemtheorie 1*“, Oldenbourg Verlag, München Wien, 1998.
- [4] Rugh, W.J.: „*Linear system theory*“, Prentice-Hall, New Jersey, 1996.

Optimaler Entwurf vernetzter ereignisbasierter Regelungssysteme

Adam Molin *

* Fachgebiet Informationstechnische Regelung
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80290 München
Tel.: 089-289-25738
Fax: 089-289-28340
adam.molin@tum.de

Sandra Hirche **

** Fachgebiet Informationstechnische Regelung
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80290 München
Tel.: 089-289-25722
Fax: 089-289-28340
hirche@tum.de

Schlüsselwörter: Ereignisbasierte Regelung, vernetzte Regelungssysteme

Das Gebiet der vernetzten Regelungssysteme hat sich zu einem sehr aktiven Forschungsfeld in der Regelungstechnik etabliert, was sich auch in der Vielfalt ihrer Anwendungsszenarien widerspiegelt. Diese reichen von Energieverteilungsnetzen über Gebäudeautomatisierung bis hin zu Roboterschwärmen für die Erkundung unbekannter Territorien. Die Hauptcharakteristik solcher Systeme ist die geographische Verteilung der Systemkomponenten und die Kommunikation über ein gemeinsames digitales Kommunikationsnetz, um komplexe Regelungsaufgaben zu lösen. Dies erfordert eine effiziente Nutzung der Kommunikationsressourcen für den Datenaustausch, insbesondere im Kontext von drahtlosen Übertragungssystemen. In vielen Situationen lässt sich feststellen, dass im Gegensatz zum konventionellen Regelungsentwurf mit periodisch abgetasteten Messungen ein ereignisbasierter Ansatz besser geeignet ist, wenn Ressourcen beschränkt sind. Ereignisbasiert bedeutet in diesem Fall, dass anhand vorhandener Messungen in einem Ereignisgenerator entschieden wird, ob der Regler eine aktuelle Messung erhalten soll, siehe Abbildung 1. In diesem Vortrag werden verschiedene Aspekte des optimalen ereignisbasierten Regelungsentwurf für lineare stochastische Systeme mit Kommunikationseinschränkungen adressiert. Es lässt sich zeigen, dass die optimale Lösung mit dem optimalen linear-quadratischen Regulator verwandt ist, wenn eine quadratische Kostenfunktion verwendet wird. Durch diese strukturelle Eigenschaft der optimalen Lösung kann das vorliegende Optimierungsproblem in zwei separate Probleme aufgespalten werden. Dadurch ergibt sich ein systematisches und numerisch effizientes Verfahren zur Berechnung des optimalen ereignisbasierten Reglers.

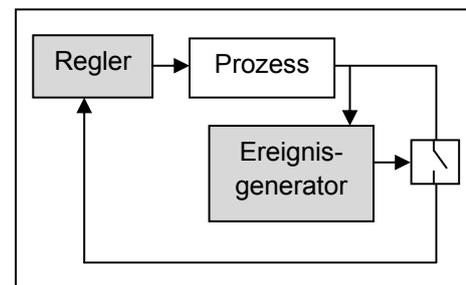


Abbildung 1: Ereignisbasiertes Regelungssystem

Literatur:

[1] A. Molin, S. Hirche, "On LQG Joint Optimal Scheduling and Control under Communication Constraints," 48th IEEE Int. Conf. on Decision and Control, 2009.

Flexible dezentrale Automatisierungs- und Regelungssysteme auf Basis von Softwareagenten

Dipl.-Ing. Stephan Pech *

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner **

* Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 47, 70550 Stuttgart
+49-(0)711-685-67305
+49-(0)711-685-67302
stephan.pech@ias.uni-stuttgart.de

** Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 47, 70550 Stuttgart
+49-(0)711-685-67301
+49-(0)711-685-67302
peter.goehner@ias.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Agentenorientierte Automatisierungssysteme, Flexibilität, Prozessüberwachung

Die Entwicklung von Automatisierungs- und Regelungssystemen ist eine beständige Herausforderung für Ingenieure. Neben der Beherrschung einer zunehmenden Komplexität und einer steigenden Dezentralisierung der Systeme gehört auch die Erfüllung bestimmter Anforderungen, wie z. B. mehr Flexibilität, Robustheit, Skalierbarkeit, Anpassbarkeit und Integrationsfähigkeit der Systeme dazu. Das Paradigma der agentenorientierten Softwareentwicklung in der Automatisierungstechnik bietet Konzepte und Methoden diesen Herausforderungen zu begegnen [1]. In der Zusammenführung der beiden Disziplinen Regelungstechnik und Automatisierungstechnik wird untersucht, auf welche Art und Weise Softwareagenten vorteilhaft für Regelungsaufgaben eingesetzt werden können. Wie in Abbildung 1 dargestellt, offenbart der Vergleich zwischen einem Softwareagenten und einem Regler einige Parallelen.

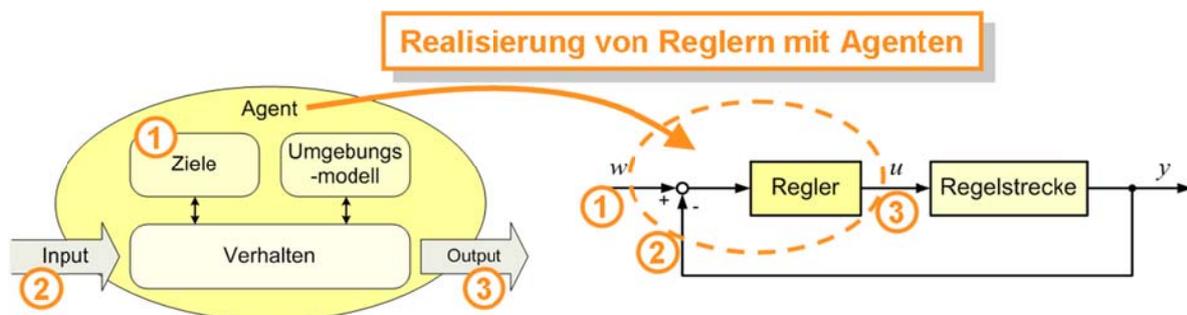


Abbildung 1: Einsatz von Softwareagenten für Regelungsaufgaben

Das Paradigma der agentenorientierten Softwareentwicklung beinhaltet beispielsweise das elementare Konzept der Zielorientierung, d. h. das Verhalten eines Agenten orientiert sich an seinen Zielen (1), die er zu erreichen versucht. Analog dazu gilt es in Regelkreisen ebenfalls Ziele, speziell Regelungsziele, zu erfüllen. Des Weiteren besitzt ein Agent einen Eingang (2), der ihm die Fähigkeit verleiht, den Zustand seiner Umgebung wahrnehmen zu können, sowie einen Ausgang (3), um zielorientiert auf seine Umgebung einwirken zu können. Im Vergleich mit dem Regler fällt auf, dass auch dieser über derartige Elemente verfügt. Im Allgemeinen sind Softwareagenten am besten geeignet für Anwendungen, die modular, dezentral, veränderbar und komplex sind [2]. Für technische Systeme ist

der Einsatz von Agentensystemen immer dann besonders vorteilhaft, wenn Konfliktsituationen auftreten. Dies ist bei Regelungssystemen z. B. der Fall, wenn mit wenigen Stellgrößen viele Regelgrößen zu beherrschen sind und sich dabei unterschiedliche Regelungsziele widersprechen. Die Agentenorientierung bietet hierfür das Prinzip der Verhandlungen zwischen den einzelnen Softwareagenten, das es erlaubt eine geeignete Konfliktlösung im Rahmen von gegebenen Freiheitsgraden zu finden.

Beim Einsatz von Softwareagenten für Regelungsaufgaben sind daher verschiedene Ansätze denkbar. Zum einen die Realisierung von kooperierenden Teilreglern durch Agenten in Mehrgrößensystemen, ähnlich zu dezentralen Regelungen. Hier können Querkopplungen innerhalb der Regelstrecke durch die Interaktion zwischen Regleragenten berücksichtigt werden. Der Vorteil der Konfliktlösungsfähigkeit eines Agentensystems wird in solchen Strukturen deutlich. Zum anderen können auch einzelne Regler aus mehreren Agenten aufgebaut werden, die jeweils unterschiedliche Aufgaben übernehmen. So kann beispielsweise ein Agent einen I-Regler repräsentieren, während ein anderer Agent einen P-Regler darstellt, um daraus einen agentenorientierten PI-Regler zu erhalten.

Im Rahmen des Beitrags wird am Beispiel eines Drei-Tank-Systems ein Konzept vorgestellt, wie ein agentenorientiertes Automatisierungssystem mittels Softwarekomponenten auf Mikrocontroller-Basis entwickelt und realisiert werden kann. Softwareagenten übernehmen dort verschiedene Rollen und haben beispielsweise die Aufgaben, den Füllstand eines Tanks auf einen vorgegebenen Sollwert zu regeln und gleichzeitig kritische Situationen, wie das Überlaufen eines Tanks, zu vermeiden.

Literatur:

- [1] Wagner, T.; Göhner, P; de A. Urbano, P. G.: Softwareagenten – Einführung und Überblick über eine alternative Art der Softwareentwicklung. Teil I. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Oldenbourg Industrieverlag, H. 10 (45), 2003
- [2] VDI-Richtlinie VDI/VDE 2653 Blatt 1: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik – Grundlagen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010

Fehlertolerante Steuerung ereignisdiskreter Systeme

Yannick Nke *

* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
und Prozessinformatik
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum
Telefon: 0234 32 24096
Fax: 0234 32 14 101
nke@atp.rub.de

Jan Lunze **

** Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
und Prozessinformatik
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum
Telefon: 0234 32 24071
Fax: 0234 32 14 101
lunze@atp.rub.de

Schlüsselwörter: Nichtdeterministische E/A-Automaten, Steuerung, Rekonfiguration

Die Verlässlichkeit technischer Systeme lässt sich mit Methoden der fehlertoleranten Steuerung steigern. Für kontinuierliche und hybride Systeme sind bereits methodische Lösungswege entwickelt worden, die auf der in Abb. 1 dargestellten Struktur beruhen. Dabei wird der Regelkreis in Abhängigkeit vom diagnostizierten Fehler rekonfiguriert, wobei sowohl die Auswahl der Mess- und Stellsignale als auch das Reglergesetz verändert werden.

Bei ereignisdiskreten Systemen existieren im Wesentlichen nur heuristische Ansätze zur Verbesserung der Verlässlichkeit technischer Systeme. Das Ziel des hier vorgestellten Ansatzes zur fehlertoleranten Steuerung ereignisdiskreter Systeme besteht darin, eine gegebene Steuerung systematisch so zu rekonfigurieren, dass die fehlerbehaftete Regelstrecke ihre Spezifikation weiterhin erfüllt. Der Ansatz ist modellbasiert und beruht auf einer ereignisdiskreten Betrachtung des fehlertoleranten Regelkreises (Abb.1), wobei der Schwerpunkt dieser Arbeit im systematischen Entwurf der Rekonfigurationseinheit liegt.

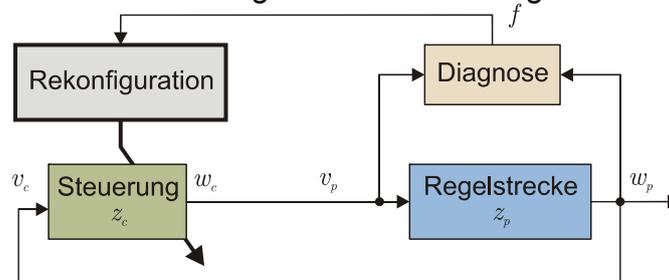


Abbildung 1: Ereignisdiskreter fehlertoleranter Regelkreis

Die Regelstrecke und die Steuerung werden mittels (nicht)deterministischer Eingangs-/Ausgangsautomaten modelliert. Beide Komponenten reagieren auf Eingaben v_c bzw. v_p mit Ausgaben w_c bzw. w_p und internen Zustandswechseln von z_c nach z'_c bzw. z_p nach z'_p . Die Diagnoseeinheit ermittelt den aufgetretenen Fehler f anhand der gemessenen Eingaben und Ausgaben der Regelstrecke. Wird ein Fehler identifiziert, so erfolgt durch die ereignisdiskrete Rekonfiguration eine Anpassung bzw. ein Neuentwurf der Steuerung unter Berücksichtigung struktureller und analytischer Freiheitsgrade, so dass der rekonfigurierte Regelkreis die Spezifikation erfüllt.

Dieser Vortrag behandelt die Bedingungen, unter denen eine rekonfigurierte Steuerung existiert, die das fehlerbehaftete System unter Einhaltung der Spezifikation steuert. In [2] wurde eine hinreichende und notwendige Bedingung zur Steuerbarkeit einer fehlerbehafteten Strecke entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass die Erfüllbarkeit der Spezifikation gekoppelt mit einem redundanzbasierten Kriterium die Rekonfigurierbarkeit der vorhandenen Steuerung gewährleisten. Die Anwendung dieses Konzepts wird an einem verfahrenstechnischen Prozess demonstriert (Abb. 2).

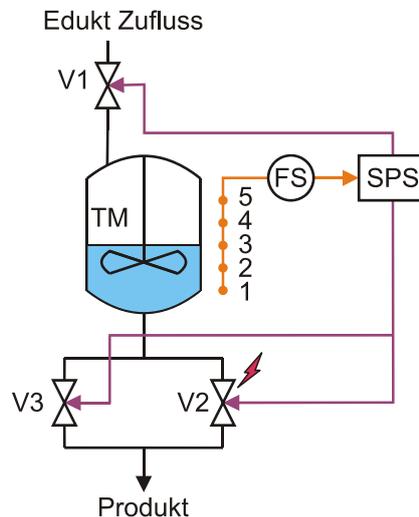


Abbildung 2: Fehlerbehafteter verfahrenstechnischer Prozess

Die Forderung nach Lebendigkeit des Regelkreises ist in [3] mittels des in [1] eingeführten Wohldefiniertheitskonzepts untersucht worden. Laufende Arbeiten beschäftigen sich mit einem systematischen Modellierungsansatz für fehlerbehaftete Systeme [4] sowie der lokalen Steuerungsanpassung mit reduziertem Suchraum.

Literatur:

[1] Nke, Y.; Drüppel, S.; Lunze, J.: Direct feedback in asynchronous networks of input-output automata. *10th European Control Conference*. Budapest, 2009, S. 2608–2613.

[2] Nke, Y.; Lunze, J.: Fault-tolerant control of nondeterministic input/output automata subject to actuator faults. *10th International Workshop on Discrete Event Systems*. Berlin, 2010, S. 360–365.

[3] Nke, Y.; Lunze, J.: Control design for nondeterministic input/output automata, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik. Bochum, 2010. – Forschungsbericht.

[4] Nke, Y.; Lunze, J.: A fault modeling approach for input/output Automata, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik. Bochum, 2010. – Forschungsbericht.

Regelung einer implantierbaren rotierenden Blutpumpe zur Linksherzunterstützung

Andreas Arndt *

* Berlin Heart GmbH
F&E
Wiesenweg 10, 12247 Berlin
(030) 8187 2627
(030) 8187 22 2627
arndt@berlinheart.de

Bernhard P. Lampe **

** Institut für Automatisierungstechnik
Universität Rostock
Richard Wagner Str. 31 / H.8, 18119 Rostock
(0381) 498 7703
(0381) 498 7702
bernhard.lampe@uni-rostock.de

Schlüsselwörter: Ventricular Assist Device (VAD), physiologische Regelung, Pulsatilität, robuste Regelung, Extremwertregelung

Rotierende Blutpumpen (RBP) werden bei terminalem Herzversagen als Herzunterstützungssysteme eingesetzt, um die Wartezeit auf ein Spenderherz zu überbrücken. Zunehmend erfolgt auch ein Langzeiteinsatz dieser Systeme als Alternative zur Herztransplantation. Das Blut wird dem linken Ventrikel (LV) durch die Einlasskanüle entnommen und über die Auslasskanüle in die Aorta gefördert (Abbildung 1). Rotierende Blutpumpen müssen ihre Fördermenge dem physiologischen Zustand des Patienten anpassen.

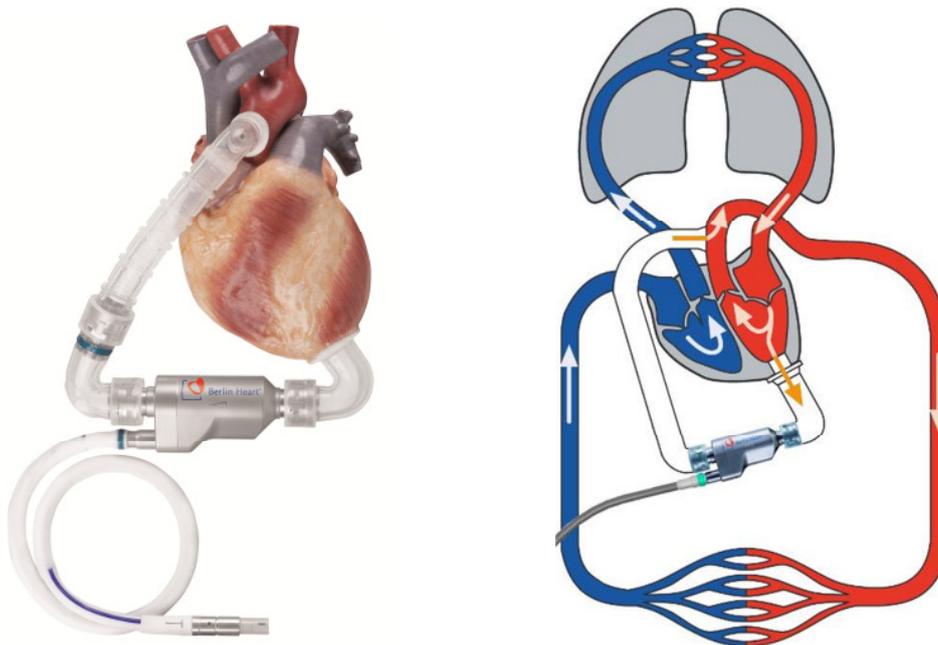


Abbildung 1 Rotierende Blutpumpe zur linksventrikulären Herzunterstützung

Regelungsverfahren für RBP setzen oft die Messung physiologischer Größen voraus [1]. Die erforderlichen Sensoren sind für Langzeitimplantate jedoch nicht verfügbar. Deshalb wird ein Verfahren vorgestellt, welches nur intrinsische Messwerte der Pumpe benötigt. Es erlaubt dem Arzt, zwischen zwei Therapieoptionen zu wählen: Maximalentlastung des linken Ventrikels oder moderate Entlastung unter kontrollierter Öffnung der Aortenklappe [2].

Als Messgröße wird der Differenzdruck Δp über der Pumpe verwendet, der aus dem vom magnetischen Lager des Rotors gemessenen Axial Schub abgeleitet wird [3]. Der Differenzdruck entspricht näherungsweise der Differenz zwischen Aortendruck und Ventrikeldruck. Aus dem Δp wird ein Pulsatilitätsindex (PI) ermittelt, der eine Information über den Füllungsstatus des LV liefert. Da durch den Pulsatilitätsindex nicht alle Betriebszustände des Systems identifizierbar sind, wird zusätzlich die Reaktion des PI auf Drehzahländerungen der Pumpe untersucht. Der Gradient (GPI) des Pulsatilitätsindex relativ zur Pumpendrehzahl wird dabei fortlaufend durch ein Parameterschätzverfahren ermittelt [3].

Der äußere Kreis eines kaskadierten Reglers regelt in Abhängigkeit vom gewählten Therapieziel GPI entweder auf seinen Extremwert oder auf einen festen Sollwert. Der innere Kreis regelt PI auf den Sollwert, der vom äußeren Kreis vorgegeben wird. Unerwünschte Betriebszustände wie das Kollabieren des Ventrikels oder Rückfluss können auf der Basis des geschätzten GPI detektiert und korrigiert werden [4]. Während die Regelung des GPI den Arbeitspunkt an langsam veränderliche physiologische Größen anpasst, reagiert die unterlagerte Regelung des PI auf schnelle Änderungen vor allem des venösen Zuflusses [5].

Ein dynamisches Simulationsmodell mit konzentrierten Parametern wurde vom unterstützten Kreislauf entwickelt und zur Simulation von Änderungen des pulmonal-venösen Druckes, der ventrikulären Kontraktilität und des Aortendruckes genutzt. Bei maximaler Entlastung des LV wurde ein kleiner PI eingestellt, ohne einen Kollaps des linken Ventrikels herbeizuführen. Bei moderater Entlastung wurde die Pumpe bei hohem PI in der Grenzregion zwischen öffnender und permanent geschlossener Aortenklappe betrieben, um die Myokardbewegung und somit die Ventrikelauswaschung zu optimieren.

Die kaskadierte Regelung des GPI und des PI ist in der Lage, das der gewählten Therapieoption entsprechende Regelungsziel zu erreichen. Dabei sind keine weiteren Einstellungen notwendig. Das System wurde umfassenden Tests *in silico* unterzogen, denen vor dem klinischen Einsatz Tests in Tierversuchen folgen werden.

Literatur:

- [1] Moscato F, Arabia M, Colacino M, Naiyanetr P, Danieli GA, Schima H. Left ventricle afterload impedance control by an axial flow ventricular assist device: a potential tool for ventricular recovery. *Artif Organs*, 32:736-44, 2010.
- [2] Arndt A, Nüsser P, Graichen K, Müller J, Lampe BP. Physiological control of a rotary blood pump with selectable therapeutic options: control of pulsatility gradient. *Artif Organs*, 32:761-71, 2008.
- [3] Arndt A, Nüsser P, Lampe BP. Regelung von rotierenden Blutpumpen zur Linksherzunterstützung. *at Automatisierungstechnik*, 58:241-50, 2010.
- [4] Arndt A, Nüsser P, Lampe BP. Fully autonomous preload-sensitive control of rotary blood pumps. *Artif Organs*, 34:726-35, 2010.
- [5] Arndt A, Nüsser P, Lampe BP, Müller J. Physiological control of a rotary left ventricular assist device: robust control of pressure pulsatility with suction prevention and suppression. In *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Munich, Germany, volume 25/7, pages 775-8. IFMBE Proceedings, September 7-12, 2009.*

Objektorientierte Modellierung und Simulation des menschlichen Herz-Kreislauf-Systems

Anja Brunberg, Dirk Abel

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen
Steinbachstr. 54
Tel.: 0241 80-27489
Fax: 0241 80-22296

E-Mail: {a.brunberg; d.abel}@irt.rwth-aachen.de

Schlüsselwörter: Objektorientierte Modellbildung, physiologische Regelkreise, Simulation

Ein grundlegendes Verständnis der Prozesse im menschlichen Herz-Kreislauf-System ist nicht nur in der medizinischen Praxis, sondern auch z.B. bei der Entwicklung von technischen Unterstützungssystemen für gestörte Kreislauf-funktionen (z.B. Kunstherz) notwendig. Herz und Blutkreislauf unterliegen jedoch dem Einfluss vieler Faktoren, z.B. Wechselwirkungen mit anderen Organ(systemen), körpereigenen Regulationsmechanismen oder externen Einflüssen (Umgebungsbedingungen oder Belastung).

Abbildung 1 zeigt dies am Beispiel des arteriellen Blutdrucks. Über verschiedene Stellglieder (u.a. Gefäßradius, Herzfrequenz und -kontraktionskraft) wird der Blutdruck von einer Vielzahl an Mechanismen beeinflusst. Das resultierende System ist nicht nur ein steifes, nichtlineares Mehrgrößensystem, zusätzlich finden u.a. Sollwertadaptionen statt.

Am Institut für Regelungstechnik wurde die Modellbibliothek „HumanLib“ entwickelt, um körpereigene Regelkreise zu analysieren und um eine geeignete Simulationsplattform für die Entwicklung und den Test von geregelten Unterstützungssystemen zu bieten [2]. Diese Bibliothek enthält eine Sammlung von verschiedenen mathematischen Modellen von physiologischen Komponenten des Herz-Kreislauf-Systems und damit verbundenen körpereigenen Regelkreisen, die nach den Prinzipien der Objektorientierung aufgebaut sind.

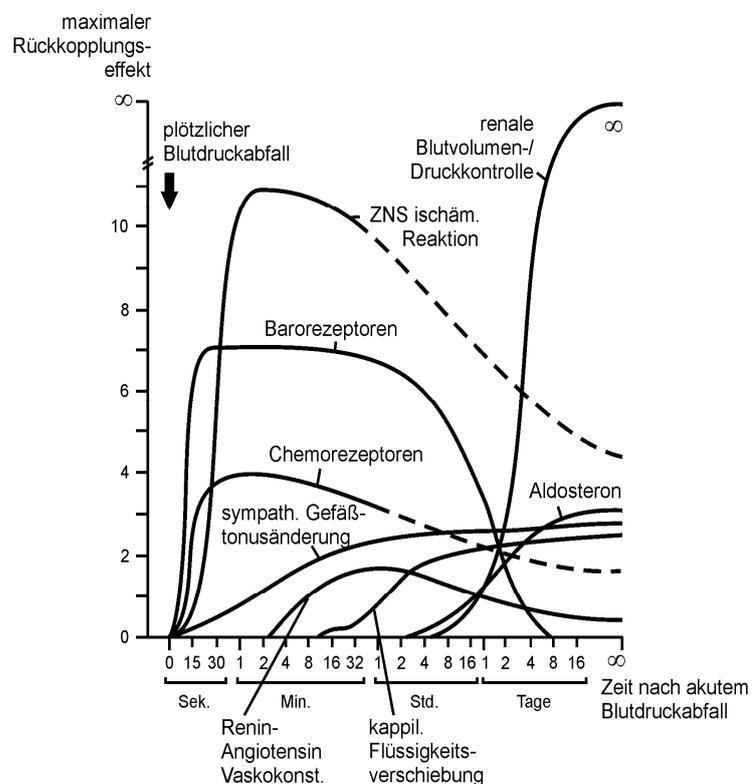


Abbildung 1: Gains verschiedener Mechanismen der Blutdruckregulation nach Guyton [1]

In der objektorientierten Modellierung wird das Gesamtsystem in Subsysteme, sog. Objekte, aufgeteilt, die anhand ihrer abstrahierten Charakteristika in Klassen zusammengefasst werden. Durch Vererbung von Objekten, Eigenschaften oder Methoden können modulare, hierarchisch strukturierte Modelle aufgebaut werden. Dabei sind funktionale Details (z.B. Variablen) innerhalb eines Objekts gekapselt und die Kommunikation zwischen zwei Objekten ist nur über vordefinierte, bidirektionale Schnittstellen möglich. Dieses Verfahren hat im Hinblick auf eine flexible Erstellung von Modellen, die für eine vorgegebene Aufgabenstellung maßgeschneidert sind, große Vorteile gegenüber herkömmlichen signalorientierten Ansätzen [3]:

- Auf der obersten Ebene kann die grundlegende Struktur des Modells leicht erkannt werden; komplexe Details sowie interne Variablen bleiben innerhalb einzelner Komponenten verborgen.
- Es besteht eine Reihe von Vorteile bei der Programmierung und Simulation, u.a. bei der Behandlung algebraischer Schleifen.
- Standardisierte Schnittstellen erlauben den Austausch einzelner Teilmodelle ohne daraus resultierende notwendige Änderungen am Gesamtmodell.
- Die Übertragung von realen physikalischen Größen anstelle von Signalen erleichtert die interdisziplinäre Zusammenarbeit.

Auf dieser Basis kann ein Simulationsmodell zusammengestellt werden, das den spezifischen Anforderungen entspricht. Es können z.B. einzelne Komponenten mit hoher Detailtiefe modelliert werden, während das restliche Kreislaufsystem gröber abgebildet wird. So lassen sich Multiskalen-Modelle aufbauen, die örtlich zwischen lokalen und globalen Mechanismen unterscheiden und die unterschiedliche Zeithorizonte umfassen. Die Kopplung von Mechanismen auf systemischer Ebene an die zugrunde liegenden physiologischen Effekte führt zu struktureller Validität des Modells. Multiskalenansätze werden in ähnlichen Fragestellungen im medizintechnischen Umfeld bereits erfolgreich verfolgt [4].

Die „HumanLib“ ermöglicht eine einfache und flexible Erstellung von Modellen, die sich an den realen physiologischen Strukturen orientieren. Die Validierung anhand von Messdaten ist Gegenstand der aktuellen Arbeiten am Institut.

Literatur:

[1] Guyton AC, Coleman TG, Cowley AW, Liard JF, Norman RA & Manning RD (1972): *Systems analysis of arterial pressure regulation and hypertension*. Ann Biomed Eng, 1, 254-281

[2] Brunberg A, Autschbach R & Abel D (2008): *Ein objektorientierter Ansatz zur Modellierung des menschlichen Herz-Kreislauf-Systems*. at – Automatisierungstechnik, 56, 476-482

[3] Brunberg A, Heinke S, Spillner J, Autschbach R, Abel D & Leonhardt S (2009): *Modeling and simulation of the cardiovascular system: a review of applications, methods, and potentials*. Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering, 54, 233-244

[4] Bassingthwaite JB, Chizeck HJ (2008): *The Physiome Projects and Multiscale Modelling*. IEEE Signal Proc Mag, 25, 121-144

Vorsteuerungs-Entwurf für verteiltparametrische Systeme mit örtlich verteiltem Eingang

Florian Malchow und Oliver Sawodny

Institut für Systemdynamik, ISYS
Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart

Telefon: +49 (0)711 685 - 66293

Fax: +49 (0)711 685 - 66371

E-Mail: {malchow,sawodny}@isys.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Systeme mit verteilten Parametern, örtlich verteilter Eingang, inversionsbasierter Vorsteuerungs-Entwurf.

In dieser Arbeit stellen wir einen neuen Vorsteuerungs-Ansatz für Systeme mit örtlich verteilten Parametern (SVP) und örtlich verteilten Eingängen vor. Das Hauptaugenmerk liegt auf thermischen Prozessen, z. B. Durchlauföfen oder Vorherden in der Glasindustrie (siehe Abb. 1). Bei solchen Anlagen werden örtlich verteilte Eingänge durch Heizstrahler, Gasbrenner oder Elektrodenheizungen realisiert. Dadurch und bedingt durch das Phänomen des Wärmetransports, ist die Berücksichtigung einer örtlichen Abhängigkeit und damit die Modellierung als verteiltparametrisches System naheliegend. Die beschreibenden partiellen Differentialgleichungen sind parabolisch, zweiter Ordnung oder, sofern Diffusion vernachlässigt werden kann, hyperbolisch, erster Ordnung. In der Regel sind diese Modelle örtlich eindimensional und die unabhängige Ortskoordinate gibt die Position entlang der Fließ-, bzw. Durchlaufrichtung an [3].

Typischerweise wird die Temperatur des Stück- oder Schmelzgutes beim Austritt und an bestimmten Messstellen innerhalb des Ofens erfasst. Die Sollwerte der Systemausgänge werden in aller Regel gemäß prozess- und produktabhängiger Spezifikationen festgelegt und durch lokale Regelkreise eingestellt. Bei Änderungen der Prozessbedingungen, z. B. aufgrund von Produktwechseln, müssen diese Sollwerte angepasst und die Anlage auf die neuen Werte verfahren werden. Im Hinblick auf die automatisierte Durchführung solcher Vorgänge wird ein inversionsbasiertes Vorsteuerungsverfahren vorgeschlagen. Ausgehend von geeignet geplanten Ausgangstrajektorien werden die entsprechenden Eingangstrajektorien bestimmt und mittels einer Vorsteuerung aufgeschaltet. Dies ist ein entscheidender Unterschied zu flachheitsbasierten Verfahren für SVP (siehe z. B. [1,2]), bei denen die Trajektorienplanung in den Koordinaten eines flachen Ausgangs stattfindet.



Abbildung 1: Pressform zur Herstellung von Behälterglas

Der vorgestellte Ansatz basiert auf einer Transformation der Systemgleichungen, die den Einfluss des örtlich verteilten Eingangs in einer für den Vorsteuerungs-Entwurf

vorteilhaften Form abbildet. In der transformierten Darstellung wird das Systemverhalten durch ein gewöhnliches, vom Systemeingang abhängiges Differentialgleichungssystem Σ_ξ und ein randgesteuertes SVP $\tilde{\Sigma}_\infty$, abhängig von den Zuständen von Σ_ξ , repräsentiert (siehe dazu Abb. 2).

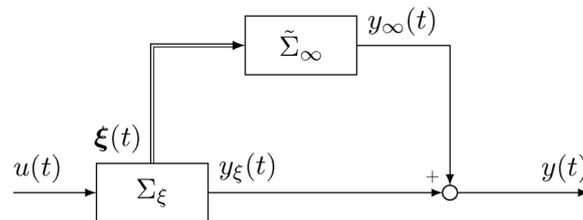


Abbildung 2: Transformierte Darstellung des Systems

Durch die Aufspaltung des Systems ergeben sich neben der in dieser Arbeit vorgestellten Herangehensweise zur Synthese von Vorsteuerungen, auch Einsichten bezüglich der Analyse des Systemverhaltens [4].

Die Anwendung des Vorsteuerungs-Ansatzes wird im Rahmen der Automatisierung von Arbeitspunktwechseln eines Glasspeisers in der Behälterglasindustrie vorgestellt. Der Speiser verbindet den Schmelzofen mit einer Glasmaschine, worin das flüssige Glas zu Flaschen oder Gläsern gepresst wird. Dabei wird die Temperatur der Schmelze innerhalb des Speisers mit Thermoelementen erfasst und durch Gasbrenner sowie Kühlklappen eingestellt.

Literatur:

- [1] Meurer, T. und Kugi, A., Trajectory planning for boundary controlled parabolic PDEs with varying parameters on higher-dimensional spatial domains. *IEEE Trans. Automatic Control*, 54(8):1854–1868, 2009
- [2] Rudolph, J., *Flatness Based Control of Distributed Parameter Systems*, Reihe: Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik. Aachen, Shaker-Verlag, 2003.
- [3] Malchow, F., Zeitz, M. und Sawodny, O., Ein Ansatz zum Vorsteuerungs-Entwurf für Transportprozesse mit örtlich verteiltem Stelleingriff. *at-Automatisierungstechnik*, 58(3):151–160, 2010.
- [4] Malchow, F., Sawodny, O., Feedforward Control of Inhomogeneous Linear First Order Distributed Parameter Systems. *Eingereicht zur American Control Conference*, 2011.

Strömungsregelung mit aktiven, nachgiebigen Wänden

Nikolas Goldin *

* FG Mess- und Regelungstechnik / Institut für
Prozess- und Verfahrenstechnik
Technische Universität Berlin
Hardenbergstr. 36a, 10623 Berlin
Tel. 030-31479283
Fax.030-31421129
nikolas.goldin@tu-berlin.de

Rudibert King **

** FG Mess- und Regelungstechnik / Institut für
Prozess- und Verfahrenstechnik
Technische Universität Berlin
Hardenbergstr. 36a, 10623 Berlin
Tel. 030-31424100
Fax.030-31421129
rudibert.king@tu-berlin.de

Schlüsselwörter: Modellprädiktive Regelung, laminare Strömungsregelung, nachgiebige Wände, Delfinhaut, Tollmien-Schlichting Wellen

Strömungsbeeinflussung durch passive und aktive Maßnahmen wird in den verschiedensten Gebieten eingesetzt. So ist beispielsweise eine Reduktion des Strömungswiderstands nicht nur bei Fahr- und Flugzeugen, sondern auch z.B. im Inneren von Pipelines wünschenswert. Nützliche Anregungen für Mechanismen der Strömungsbeeinflussung können aus dem Tierreich gewonnen werden. So berechnete Gray 1936, dass der Delfin bei Annahme einer turbulenten Umströmung enorme Kraft bräuchte, um seine Geschwindigkeit zu erreichen. Die Frage, ob und wie der Delfin es schafft, die Grenzschicht seiner Umströmung laminar und damit widerstandsarm zu halten, beschäftigt seitdem die Wissenschaft. Eine Möglichkeit ist die Nachgiebigkeit seiner Haut. Im Jahr 1957 veröffentlichte Kramer Experimente, bei denen es ihm gelang, den Strömungswiderstand von Körpern zu reduzieren, indem er sie mit einer nachgiebigen, künstlichen Delfinhaut überzog. Seine Experimente wurden kontrovers diskutiert, bis es auch in numerischen Simulationen möglich war, mittels nachgiebiger Wände, die laminar-turbulente Transition zu verzögern und somit den Strömungswiderstand zu reduzieren [1].

Die Verzögerung der Transition beruht auf der Reduktion instabiler Störungen in der Grenzschicht, den Tollmien-Schlichting Wellen, welche sonst den Strömungsumschlag auslösen würden. Ein Nachteil nachgiebiger Wände ist jedoch, dass sie in Wechselwirkung mit der Strömung neue Instabilitäten erzeugen können, welche die gewonnene Reduktion zunichte machen. Daher muss für eine erfolgreiche Laminarhaltung die Elastizität der eingesetzten Wand auf den aktuellen Strömungszustand abgestimmt sein. Beim Delfin wäre eine solche Variation der Elastizität durch lokal verschiedene Körpertemperaturen oder Muskelspannungen denkbar, für künstliche nachgiebige Wände stellt sie eine Herausforderung dar.

Eine Möglichkeit, variable Elastizitäten zu erzeugen, besteht in der Verwendung von aktiven Wänden. Bei diesen wird die Auslenkung verschiedener Wandpositionen durch Aktuatoren direkt eingestellt. Die Pseudoelastizität ergibt sich durch Auswertung eines Wandmodelles, welches die Reaktion der Wand auf einen gegebenen Strömungszustand festlegt. Dadurch kann eine Anpassung der Pseudoelastizität durch Adaption des Wandmodells vorgenommen werden, ohne dass Änderungen am Material der Wand vonnöten wären.

Das Wandmodell benötigt den Strömungszustand über dem aktiven Wandsegment als Eingangsgröße. Da keine Sensoren auf der flexiblen Oberfläche des aktuierten Segments platziert werden können, muss dieser Strömungszustand aus den Messungen stromauf gelegener Sensoren geschätzt werden. Hierzu

können niederdimensionale Modelle auf Basis der Navier-Stokes Gleichung genutzt werden [2], was jedoch örtlich hochauflösende Simulationsdaten voraussetzt. Im Experiment haben sich einfachere Modelle auf Basis einer Systemidentifikation bewährt.

Bei der Regelung der Wandauslenkung kommt es vor allem auf eine phasentreue Verfolgung der durch das Wandmodell vorgegebenen Trajektorie an, da im Prinzip eine Gegenwelle zur ankommenden TS Welle erzeugt werden muss, so dass es zur Auslöschung durch negative Superposition kommt. Das Problem lässt sich als Störgrößenaufschaltung formulieren. Da es sich bei den auszulöschenden TS Wellen um stochastisch auftretende Wellenpakete mit gemischten Frequenzinhalten handelt, muss das Folgeverhalten der Wand über einen ganzen Frequenzbereich, in unseren Experimenten ca. 300-600Hz, gewährleistet werden.

Der verwendete Aktuator (Abb. 1) besteht aus einzeln ansteuerbaren Piezo-Polymer-Komposit Aktuatorbalken, welche mit einer Silikonmembran überspannt sind [3]. Durch die Verbindung der Balken mit der vorgespannten Membran entsteht ein gekoppeltes System. Für den Regelbetrieb liegen keine Messdaten der Auslenkung vor, im Gegensatz zur Modellbildungsphase, wo extern montierte Vibrometer verwendet werden.

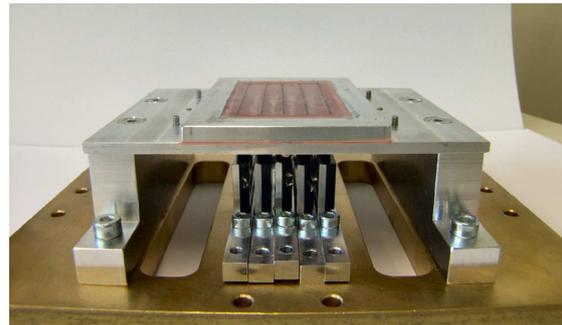


Abbildung 1: Aktives Wandsegment

Da das Modell der Strömung, welches für die Schätzung der Eingangsdaten der Wand verwendet wird, eine Totzeit enthält, kann nicht nur die jeweils aktuelle Führungsgröße berechnet werden, sondern eine Trajektorie zukünftig zu erreichender Führungsgrößen. Um diese zusätzliche Information auszunutzen, wird für die Regelung der Wand eine modellprädiktive Regelung verwendet. Diese kann für das vorliegende lineare Aktuatormodell ohne Stellgrößenbeschränkungen analytisch berechnet werden [4], so dass sie sich bei der notwendigen Abtastfrequenz von 5kHz in Echtzeit realisieren lässt. Mit der geschilderten aktiven Wand gelingt es, die Amplitude der TS Wellen um über 80% zu dämpfen. Dies führt zu einer Verschiebung des Strömungsprofils und somit der Transition, um bis zu 80mm, was 160% der Länge des aktiven Wandsegments entspricht.

Literatur:

- [1] Carpenter und Morris, "The effect of anisotropic wall compliance on boundary-layer stability and transition", J. Fluid Mech., Vol. 218, 1990, S. 171-223
- [2] Losse und King, "Strömungsregelung mit flächiger Wandaktuation und Galerkin-MPC Schema", at-Automatisierungstechnik, Vol. 58, 2010, S. 161-167
- [3] Haller, Pätzold, Losse, Peltzer, Nitsche, King und Woias, "A Piezo-Polymer Based Movable Wall for Active Cancellation of Flow Instabilities Across Airfoils", Digest Tech. Papers ICAS09, 2009
- [4] King, Aleksic, Gelbert, Losse, Muminovic, Brunn, Nitsche, Bothien, Moeck, Paschereit, Noack, Rist, Zengl, "Model Predictive Flow Control", 4th AIAA Flow Control Conference, AIAA paper 2008-3975