

35. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM

BOPPARD

14.-16. FEBRUAR 2001

**PROGRAMM
KURZFASSUNGEN**

35. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD
14.-16. FEBRUAR 2001

Programm und Kurzfassungen

Mittwoch, 14. Februar 2001

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

Donnerstag, 15. Februar 2001

08:45 – 09:15 Eröffnung und Begrüßung (Raum 1)
Prof. Dr. techn. K. Janschek, TU Dresden

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
09:15 – 10:45	Verteilte Systeme <i>Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski</i>		Wissensbasierte Systeme <i>Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. G. Reinig</i>	
09:15 – 09:45	Ein Petri-Netz-basiertes Komponentenmodell für den Entwurf verteilter Steuerungen von fertigungstechnischen Prozessen <i>H. Wurmus (Univ. Hannover, Wagner)</i>	1	Fuzzy-basierte multikriterielle Regleroptimierung für verfahrenstechnische Prozesse mit großer Messzeit <i>M. Sajidman (FhG Karlsruhe, Steusloff)</i>	7
09:45 – 10:15	Practical modeling and verification of distributed control systems <i>V. Vyatkin (Univ. Halle, Hanisch)</i>	3	Rekurrente Fuzzy-Systeme <i>R. Kempf (TU Darmstadt, Adamy)</i>	9
10:15 – 10:45	Analyse sicherheitsrelevanter verteilter Systeme <i>D. John (Univ. Karlsruhe, Kiencke)</i>	5	Vergleich unterschiedlicher neuronaler Regelungskonzepte am Beispiel eines nichtlinearen Temperaturregellungs-systems <i>D. Karimanzira (TU Ilmenau, Wernstedt)</i>	11

10:45 – 11:15 Kaffeepause

11:15 – 12:15	Plenarvortrag Robotik im Jahrhundert der Biologie <i>Prof. Dr. W. Banzhaf, Lehrstuhl für Systemanalyse, Fachbereich Informatik, Universität Dortmund</i>
----------------------	---

12:15 – 14:00 Mittagessen

	Navigation		Mobile Systeme	
14:00 - 15:00	Navigation <i>Sitzungsleitung: Prof. Dr. E. P. Hofer</i>		Mobile Systeme <i>Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. hc. H. Strobel</i>	
14:00 – 14:30	Sensor- und Navigationsdatenfusion für ein autonomes Fahrzeug <i>A. Simon (TU Braunschweig, Schumacher)</i>	12	Agentorientierte Systemarchitektur für einen Rehabilitationsroboter <i>Chr. Martens (Univ. Bremen, Gräser)</i>	16
14:30 – 15:00	Bildgestützte Bewegungsanalyse mittels optischer Korrelation zur bordautonomen Navigation von Satelliten <i>S. Dyblenko (TU Dresden, Janschek)</i>	14	Einordnung von Fahrdynamik-Regelungen in das Referenzmodell der Fahrzeugautomatisierung <i>J. Helbig (TU Braunschweig, Schnieder)</i>	18

35. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

14.-16. FEBRUAR 2001

15:00 – 15:30 Kaffeepause

15:30 – 16:30	Mehrgrößenregelungen Sitzungsleitung: Prof.Dr.-Ing. G. Roppenecker	Teleteaching Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. G. Lappus
15:30 – 16:00	Reglerentwurf mit konvexer Programmierung - ein Vergleich <i>M. Horn (TU Graz, Dourdoumas)</i>	20 Reale Systeme im virtuellen Labor <i>Chr. Röhrig (Univ. Hagen, Hoyer)</i>
16:00 – 16:30	Reglerentwurf für Regelkreise in Feldbussystemen <i>Th. Eymann (Univ. Essen, Tracht)</i>	21 DYNAMIT-Erlernen von Systemeigenschaften mit Multimedia-Mitteln <i>S. Pegel (Univ. Dortmund, Engell)</i>

16:45 - 17:45	Podiumsdiskussion
	Regeln oder Automatisieren? ---Standpunkte zu zeitgemäßen Grundlagenvorlesungen auf unserem Fachgebiet -- <i>Moderation: Prof. Dr. J. Lunze, Universität Hamburg-Harburg</i>

18:30 Abendessen

Freitag, 16. Februar 2001

08:30 – 10:30	Regelungs- und Steuerungsentwurf Sitzungsleitung: Prof.Dr.-Ing.habil. U. Korn	Modellbildung Sitzungsleitung: Prof.Dr.-Ing.Dr.h.c. M. Zeitz
08:30– 09:00	Strukturvariable Regelungssysteme, basierend auf mehrdeutigen Ljapunov-Funktionen <i>F. Niewels (Univ. Dortmund, Kiendl)</i>	27 Identifikation nichtlinearer Prozesse mit lokal linearen Modellen <i>S. Töpfer (TU Darmstadt, Isermann)</i>
09:00 – 9:30	High-Performace Gain-Scheduling Controllers <i>P. Korba (Univ. Duisburg, Frank)</i>	29 Robuster Entwurf von Kompensatoren für komplexe hysteres- und kriechbehaftete Nichtlinearitäten am Beispiel von piezoelektrischen Aktoren <i>K. Kuhnen (Univ. Saarland, Janocha)</i>
09:30 – 10:00	Verifikation des SIPN-Programms mittels Model Checking Verfahren <i>X. Weng (Univ. Kaiserslautern, Litz)</i>	31 Informationsmodell für die Produkt- und Gerätedatenverwaltung <i>M. Heeg (RWTH Aachen Eppele)</i>
10:00 – 10:30	Fehlerdiagnose mit qualitativen Modellen <i>J. Schröder (TU Hamburg, Lunze)</i>	33 Netzpendelverhalten des erweiterten europäischen Verbundnetzes bei deregulierter Energiewirtschaft <i>M. Kurth (Univ. Stuttgart, Welfonder)</i>

10:30 – 11:00 Kaffeepause

35. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

14.-16. FEBRUAR 2001

11:00 – 13:00	Nichtlineare Regelungen Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. F. Dörrscheidt	Robotik Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. R. Lunderstädt
11:00 – 11:30	Nichtlineare Regelung einer industriellen Reaktivdestillationskolonne <i>St. Grüner (Univ. Stuttgart, Gilles)</i>	Modellbildung, Regelung und Rechnersimulation räumlicher servopneumatischer Parallelroboter <i>W. Klier (Univ. Kassel, Hahn)</i>
11:30 – 12:00	Robuste Regelung der Wiederanlegelänge einer überströmten, rückwärts-gewandten Stufe <i>R. Becker (TU Berlin, King)</i>	Modulares Koordinatentransformations- und Bahninterpolatormodell für redundante Roboterkinematiken <i>R. Nawaz (TU Freiberg, Löber)</i>
12:00 – 12:30	Auslegung robuster Autopilotenfunktionen mit nichtlinearer dynamischer Inversion <i>G. Looye (DLR Oberpfaffenhofen, Ackermann)</i>	Bahnfolgeregelung seilgeführter Handhabungssysteme <i>T. Maier (Univ. Rostock, Friedrich)</i>
12:30 – 13:00	Adaptiver λ -Trajektorienfolgeregler für nichtlineare Systeme mit höherem relativen Grad <i>E. Bullinger (Univ. Stuttgart, Allgöwer)</i>	Walk! Ein kooperatives, neuroprothetisches System zur Wiederherstellung des Ganges <i>Th. Fuhr (TU München, Schmidt)</i>

13:10 – 13:30	Abschlussdiskussion, Preisverleihung, Schlusswort
---------------	--

13:30 – 14:30 Mittagessen

14:30 Ende des Kolloquiums

Ein Petri-Netz-basiertes Komponentenmodell für den Entwurf verteilter Steuerungen von fertigungstechnischen Prozessen

H. Wurmus

Institut für Steuerungstechnik
Universität Hannover
Lange Laube 32, 30159 Hannover
Tel.: +49/511/762 4421
Fax: +49/511/762 4012
Email: wurmus@isde.uni-hannover.de

Schlüsselwörter: Komponenten, Petri-Netze, verteilte Steuerungen, IEC 61499

Verteilte Automatisierungssysteme werden zunehmend eingesetzt und sind in Forschung und Entwicklung ein aktuelles Thema. Verteilt ist dabei nicht mehr nur der zu automatisierende Prozess sondern auch die Steuerungs-Software. Durch die Vernetzung der Geräte und die Kommunikationsverbindungen der Software bildet diese Software trotz der Verteilung ein System.

Durch die neuen System-Bestandteile Verteilung und Kommunikation ergeben sich neue Anforderungen an die Entwurfs-Werkzeuge und die Steuerungs-Software, die bislang noch nicht erfüllt werden. Insbesondere die Tatsache, dass die Steuerung gleichzeitig verteilt ist und dennoch ein System bildet, kann bislang nicht hinreichend dargestellt werden. Daneben ist eine Modellierung erforderlich, die über einen großen Bereich skaliert werden kann. Dieser Bereich reicht von kleinsten Funktionseinheiten über verteilbare Programm-Module, Gruppierungen solcher Module bis zur Anwendung, der Steuerung, als Ganzes. Schon auf niedrigen Ebenen dieser Hierarchie gibt es Parallelität in den Ablaufstrukturen, die darzustellen ist.

Der Ansatz dieser Arbeit nimmt eine Verhaltensbeschreibung durch Petri-Netze vor. Diese Beschreibung ist grafisch, kann Parallelität explizit darstellen und ist formal, also als Basis für Analyse und Verifikation geeignet. Die verwendeten Petri-Netze sind eine Erweiterung der steuerungstechnisch interpretierten Petri-Netze. Es gibt Schaltausdrücke für die Prozess-Eingänge, Ausgabefunktionen für die Prozess-Ausgänge, Zeitbewertung der Präkanten zur Zeitmodellierung sowie typisierte und informationstragende Marken für Werkstückdaten. Zur Hierarchiebildung wird ein an die IEC 61499 [2] angelehnter Komponentenansatz verwendet.

Ein Schritt zur Kombination von Petri-Netzen und Komponenten nach IEC 61499 wurde in [1] unternommen, dort wurden die Funktionsbausteine durch Petri-Netze abgebildet. Dieses Vorgehen führt jedoch zu komplexen Netzen, so dass hier der umgekehrte Weg beschritten wird. Ausgehend von der Darstellung durch Petri-Netze wird ein Komponentenmodell gebildet.

Ein großer Vorteil von Komponenten ist ihre strikte Kapselung der Funktionalität und Algorithmen hinter der Schnittstelle, wodurch eine vergleichsweise große Eigenständigkeit erreicht wird. Trotzdem sind Annahmen über die Umgebung erforderlich, die in Vereinbarungen über das Verhalten der Komponenten-Schnittstellen und deren Interaktion mit den Algorithmen bestehen. Nur so ist eine Kombination zu größeren Einheiten möglich. Bei der Modellierung durch Petri-Netze wird diese Notwendigkeit durch die bei jedem Schaltvorgang zu erfüllenden Vor- und Nachbedingungen besonders deutlich. Diese Bedingungen wirken auch an

Komponenten-Grenzen und können dort das Schalten von Transitionen in verbundenen Komponenten verhindern, wenn sie nicht erfüllt sind.

Diese Mechanismen ermöglichen die Synchronisation zwischen den Komponenten. Falsch eingesetzt wird auf diese Weise jedoch die Einhaltung von Zeitbedingungen des Prozesses verhindert. Die Schnittstellen-Definition ist daher eine der Kernaufgaben bei der Entwicklung eines Komponentenmodells für Petri-Netze. Da die Ein- und Ausgänge der Komponenten unterschiedliche Aufgaben erfüllen, gibt es auch verschiedene Typen von Schnittstellen, die jeweils ein klar definiertes Verhalten besitzen.

Die gemeinsame Basis aller Schnittstellen ist die Festlegung der Petri-Netz-Elemente. Die Eingänge sind Stellen zugeordnet, die Ausgänge Transitionen (Abbildung 1). So ist es möglich,

Ein- und Ausgänge direkt durch Petri-Netz-Kanten zu verbinden. Weitere Eigenschaften der Schnittstellen und Komponenten dienen der Typisierung. Diese Eigenschaften werden auf verschiedenen Ebenen der Modellierung beschrieben.

Auf der Ebene der Netzelemente können beschränkte oder unbeschränkte Eingangs-Stellen verwendet werden. Eine höhere Modellierungs-Ebene beschreibt das Ein- und Ausgangsverhalten. In beschränkten Eingangs-Stellen können Marken z.B. entweder bis zur Verarbeitung liegen bleiben und damit den Eingang blockieren oder aber sofort entfernt werden, im Zweifelsfall durch Verwerfen der Marke mit allen zugeordneten Informationen. Auf der höchsten Ebene der Beschreibung geht es um Komponenten- oder Dienst-Protokolle, also darum, welche Ein- und Ausgänge in welcher Reihenfolge an einer erfolgreichen Kommunikation beteiligt sind.

Mit den Konzepten dieser Arbeit wird es möglich, Petri-Netze als wiederverwendbare Komponenten zu verwenden. Die Verwendung dieser Komponenten ist dabei einfacher als eine komplette Modellierung mit Petri-Netzen, da nur grundlegende Petri-Netz-Strukturen zum Verbinden der einzelnen Komponenten benötigt werden. Durch Kapselung und Hierarchisierung bleibt die Übersicht auf den unterschiedlichen Abstraktionsebenen gewahrt.

Literatur:

- [1] H. Wurmus, B. Wagner: „IEC 61499 konforme Beschreibung verteilter Steuerungen mit Petri-Netzen“. Im Tagungsband der Fachtagung Verteilte Automatisierung 2000, Magdeburg, 80–87.
- [2] „Committee Draft – Function Blocks for Industrial-Process Measurement and Control Systems“. International Electrotechnical Commission, Technical Committee No. 65: Industrial-Process Measurement and Control, Working Group 6. 2. Mai 1999.

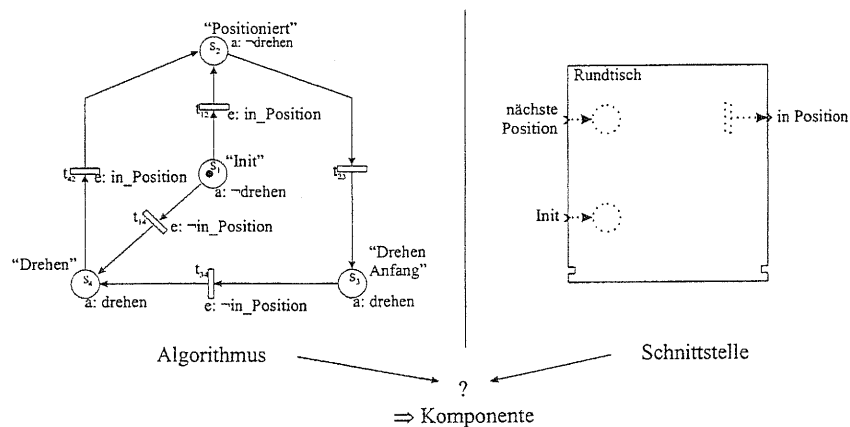


Abbildung 1: Algorithmus und Schnittstelle

Practical modeling and verification of distributed control systems

Valeriy Vyatkin

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Martin Luther Universität Halle-Wittenberg
Kut-Mothes Strasse 1, 06099 Halle
Tel.: +49/345/55 25 972
Fax: +49/345/552 7304
Email: Valeriy.Vyatkin@iw.uni-halle.de

Schlüsselwörter: Verification, Distributed controllers, IEC-61499

The concept of distributed programming brings a lot of convenience to system designers. However, clarity and reliability of the distributed controllers are questionable. In this talk we show how a framework of modeling and verification of discrete control systems, which has been developing through the last decade, can be applied to the new world of distributed control systems.

The new standard IEC-61499 ([2]) is an attempt to reflect the latest trends of distributed control system design and provide a uniform concept of programming in such systems. These trends combine the distributed architecture of control systems (like those based on the Fieldbus devices), and requirements to outstanding flexibility of production equipment, which ask for easily re-configurable and reusable software components. The IEC-61499 offers a new concept of function blocks, which is an independent software component, connected to other blocks via data and event signals. An application in terms of IEC-61499 is a net of such function blocks. The system is defined by mapping the (hardware independent) application to a particular (maybe distributed) architecture.

From the system engineering point of view, each unit of the production equipment is supplied by an elementary controller, and assembling of a more complex plant from the units is accompanied by interconnection of the corresponding component controllers into the controller of the whole plant. It is clear that the execution logic of such a resulting controller is much more intricate than that of a concentrated sequential controller. Moreover, it is implicitly presumed that the controller of the integrated system has to be obtained automatically. Hence, the usual debugging techniques, even those using simulation, do not help much to ensure the correctness of the distributed controllers. We attempt to solve this problem applying formal methods of validation, based on modeling, specification and model checking. To answer the challenges we develop a modeling and verification framework, the cornerstone of which is the formalism of Signal Net Systems (SNS), which combines the means to describe event-driven behavior with visuality and other advantages of Petri Nets, and with modularity of Condition/Event Systems. The modular composition of models in the block-diagram way helps to preserve the original structure of the system in the model, and is intuitively understandable to any engineer. The modeling process is supported by a number of tools intended for model-preparation and automatic model-generation, as well as for the model-checking and analysis. Composition of the models of interconnected control systems in this framework can be started from the modeling of plant. The model of plant can be built as a composition of component models, some of which can be retrieved from the library of standard model units. This activity is supported by the visual editor of SNS models.

A model for the controller can be automatically generated if a source code of the controller is available. The model generator VEDA deals with the controllers represented according to the

IEC 61499, which embodies as traditional languages of discrete controller description, as well as event-connected function blocks. The model analysis tools SESA and MASC provide means of the structural model analysis, including checking of boundedness, safety, search of dead traps, as well as the reachability based analysis, which includes the proof of temporal logic formulae and interpretation of the results. The visual specification language TDSL allows to define the specifications in the form of timed diagrams appended by temporal operators. The semantics of the specification language is extended as compared to traditional temporal logic-based languages to better cope with event-oriented features of distributed systems. And finally, the analysis of system trajectories is also provided by means of timed diagrams.

Thus we attempt to provide an integrated approach to modeling and model - checking, which is hoped to be useful for validation and analysis of modern distributed control systems.

Literature:

- [1] V. Vyatkin; H.-M. Hanisch: Practice of modeling and verification of distributed controllers using Signal-Net Systems, in Proceedings of the Workshop on Concurrency, Specification and Programming' 2000, Berlin, 2000, 335—349
- [2] IEC61499- Function Blocks for Industrial Process Measurement and Control Systems, International Electrotechnical Commission, Draft, Tech.Comm. 65, Working group 6, Geneva

Analyse sicherheitsrelevanter verteilter Systeme

D. John, U.Kiencke *

* Institut für Industrielle Informationstechnik
Universität Karlsruhe
Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe
Tel.: +49/721/608 4521
Fax: +49/721/608 4500
Email: john@iit.etec.uni-karlsruhe.de

Schlüsselwörter: Verteilte Systeme, Sicherheitsrelevanz, Max-Plus Algebra, Entwurfsanalyse

In Zukunft werden immer mehr intelligente Teilsysteme zu komplexen verteilten Systemen vereint. Die Teilsysteme arbeiten autonom, sind aber auf die Interaktion mit anderen Teilsystemen angewiesen. Ziel muß es daher sein, einen Entwurfsprozeß für diese Systeme zu entwickeln, bei dem verschiedene Aspekte betrachtet werden. Neben der Echtzeitfähigkeit ist vor allem die Bewertung der Fehlerausbreitung von Bedeutung, da die Elektronik in alle Bereiche vordringt und immer mehr sicherheitsrelevante Systeme beispielsweise im Automobil automatisiert werden („X-by-wire“). Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem ein System einheitlich auf Fehlerausbreitung und Echtzeitfähigkeit untersucht werden kann.

Ein verteiltes System zeichnet sich durch eine räumliche und funktionale Verteilung von Informationsgewinnung, Informationsverarbeitung und Datenspeicherung aus. Viele Einzelkomponenten arbeiten unabhängig voneinander, sind nur durch Informationsaustausch miteinander verbunden und erfüllen doch eine gemeinsame Funktion. Solch eine verteilte Systemarchitektur hat zahlreiche Vorteile. Eine flexible Gestaltung und eine einfache Erweiterbarkeit ist bei dieser Art von Systemen möglich. In der Verteiltheit liegt die Chance zur Nutzung von inhärenter Redundanz. Durch die Verteiltheit der Systeme entstehen aber auch Probleme. Das Leistungsverhalten der verteilten Systeme läßt sich aufgrund einer Vielzahl parallel ablaufender Prozesse nicht mehr einfach abschätzen. Die Übersicht über das Gesamtsystem kann verloren gehen.

Das Ziel ist es, zuverlässige Aussagen über ein verteiltes System treffen zu können, während man sich noch in einer sehr frühen Phase des Entwurfs befindet. Dort ist es naturgemäß leichter, Änderungen vorzunehmen. Dafür muß eine adäquate vereinfachte Beschreibung der Funktionalität des Systems gefunden werden, die eine Bewertung ermöglicht und den Weg zu einer Optimierung öffnet. Für die Anwendungsmodellierung existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden und Werkzeuge. Dabei lassen sich im wesentlichen zwei Gruppen unterscheiden. Das sind zum einen Methoden, bei denen die rein funktionale Modellierung im Vordergrund steht (z.B. Statemate). Diese Methoden bieten Möglichkeiten für eine funktionale Analyse, sie bieten jedoch keine Unterstützung zur Verifikation der spezifizierten zeitlichen Anforderungen. Die Verifikation der zeitlichen Anforderungen kann durch die zweite Gruppe von Methoden unterstützt werden. Eine der bekanntesten ist die Warteschlangentheorie. Mit diesen Methoden läßt sich das zeitliche Verhalten einer Anwendung analysieren.

Die hier verwendete Modellierungsmethodik hat beide Aspekte im Blick, den funktionalen sowie den zeitlichen. Dazu ist es erforderlich eine einheitliche Grundlage zur Behandlung von Zeit bzw. Information zu definieren, mit der sich das zeitliche und räumliche Ausbreitungsverhalten von Information beschreiben läßt. Dies gelingt, indem eine erweiterte Max-Plus Algebra [2] verwendet wird. Diese erlaubt es, den Entwurf in einer sehr frühen

Phase zeitlich und funktional zu beurteilen. Den beiden ursprünglichen Algebren, der Max-Plus und der Min-Plus Algebra ([1], [2]), liegt zugrunde, daß sie die nichtlinearen Verknüpfungen Maximum bzw. Minimum in eine lineare Algebra überführen. Der Graph des verteilten Systems wird hiermit in eine algebraische Beschreibung überführt, wobei die Topologie in den Systemmatrizen enthalten ist. Ansätze zur Beurteilung zeitlicher Aspekte beim Systementwurf mit Hilfe der Min-Plus Algebra sind in [4] zu finden.

Es muß häufig eine Unterscheidung der Logik der Informationsverknüpfungen gemacht werden. Z.B. ist bei Informationsbedarf von allen Vorgängern eine Maximum Verknüpfung zu verwenden. Zudem muß untersucht werden, ob und wenn ja inwieweit zeitliches und funktionales Verhalten mit der gleichen Verknüpfungslogik beschrieben werden können. Diese Unterschiede sind im vorliegenden Modell berücksichtigt worden. Weiterhin werden spezielle Verknüpfungen betrachtet, bei denen das korrekte Signal weitergeleitet wird. Dies erfordert die Hilfe von Diagnosefunktionen, die im Normalfall auf zwei ankommende Signale angewendet werden. Beim Vergleich mehrerer Informationen wird auf Mehrheitsentscheider zurückgegriffen. Dies alles hat zur Folge, daß eine Beschränkung auf eine Maximum bzw. eine Minimum Bildung nicht ausreicht, sondern beide Operationen gleichzeitig benötigt werden. In der erweiterten Max-Plus Algebra werden beide zur Verfügung gestellt. Mit deren Hilfe können alle oben genannten Funktionen abgebildet und die Auswirkungen der Verteiltheit zeitlich und funktional beurteilt werden. Damit gelingt es, die Systemmatrizen mit den gleichen Operationen sowohl bezüglich ihrer zeitlichen Leistungsfähigkeit als auch bezüglich der Fehlerausbreitung im System zu bewerten.

Es stellt einen wesentlichen Schritt dar, die zeitliche Worst Case Analyse mit der Fehlerausbreitungsanalyse zu verknüpfen und diese mit dem gleichen Modell berechnen zu können. Damit kann die Aussage getroffen werden, ob ein gegebener Entwurf durchführbar ist oder nicht. Schon zu Beginn der Systementwicklung wird das Ziel des fehlertoleranten Entwurfs verfolgt und überprüft. Des Weiteren ist es möglich, Analysen und Bewertungen bezüglich der Fehlertoleranz am Modell vorzunehmen und damit den weiteren Entwicklungsprozeß zu beeinflussen. Für weitere Untersuchungen kann selbstverständlich weiteres Wissen in Form der konventionellen Fehlerbaumanalyse (FBA) oder der Fehler-Möglichkeiten und Einfluß-Analyse (FMEA) hinzugezogen werden.

Literatur:

- [1] Bacelli, F. et al., Synchronisation and Linearity, Wiley&Son, Chichester, 1992
- [2] John, D., Bort, P.: Real time system design with Max Min Plus Algebra, IAR Annual Conference, Strasbourg, 1999
- [3] Kiencke, U.: Ereignisdiskrete Systeme, Oldenbourg Verlag, München, 1997
- [4] Neumann, K. J.: Partitionierung verteilter Echtzeitfunktionen in vernetzten Systemen, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1997

Fuzzy-basierte multikriterielle Regleroptimierung für verfahrenstechnische Prozesse mit großer Messtotzeit

Thomas Bernard, Markoto Sajidman

Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 (0)721/6091-360, Fax +49 (0)721/6091-413, Email: bnd@iitb.fhg.de, saj@iitb.fhg.de

Kurzfassung:

Bei der Optimierung von Regelungssystemen sind in der Praxis oft mehrere unterschiedliche, sich zum Teil widersprechende Gütekriterien mit unterschiedlichen Gewichtungen bzw. Priorisierungen zu berücksichtigen. Bei verfahrenstechnischen Prozessen sind dies zum Beispiel:

- gutes Störverhalten der Regelung, d.h. auftretende Störungen sollen so gut wie möglich gedämpft oder kompensiert werden,
- gutes Führungsverhalten zur Gewährleistung der stationären Genauigkeit durch Kompensation von Drifts und/oder Parameterschwankungen,
- ständig gesicherte Stabilität des geschlossenen Regelkreises,
- geringer Stellaufwand zur Minimierung des Energieeinsatzes bzw. zur Vermeidung zusätzlicher Systemanregungen und
- Robustheit, d.h. auch bei nicht genau bekannten Streckenparametern ist das Regelverhalten noch zufriedenstellend.

Ziel des Reglerentwurfs ist die multikriterielle Optimierung der Reglerparameter bei möglichst guter Erfüllung der gewichteten Teilgüteforderungen. Gesucht sind besonders solche Entwurfsverfahren, die auch für Benutzer mit begrenzten regelungstheoretischen Vorkenntnissen eine transparente anwendungsspezifische Verknüpfung der Teilkriterien und deren Gewichtung bzw. Priorisierung ermöglichen

Ein Ansatz zum multikriteriellen Regelungsentwurfsverfahren beruht auf der Optimierung eines vektoriellen Gütekriteriums (vgl. z. B. [1], [2], [3]). Hierbei werden einzelne Teilkriterien zu einem Gütevektor zusammengefasst. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems werden unterschiedliche Möglichkeiten vorgeschlagen, wobei eine Methode darin besteht, eine Lösungsmenge zu bestimmen, bei der jedes Teilkriterium einem bestimmten Anspruchsniveau genügt [2]. Hierbei ergeben sich jedoch oft komplexe Optimierungsprobleme, zu deren Lösung heute häufig Evolutionsstrategien eingesetzt werden [3].

Eine weitere Lösungsmöglichkeit besteht darin, die Teilkriterien zu einem Ersatzkriterium zusammenzufassen und somit das multikriterielle in ein monokriterielles Optimierungsproblem zu überführen [3]. Bei der Erstellung eines Ersatzkriteriums besteht jedoch die Gefahr, dass sich konkurrierende Teilkriterien kompensieren. Da in einem solchen Fall die erhaltene "optimale" Lösung kaum noch einen Rückschluss auf die Erfüllung der einzelnen Teilkriterien zulässt, ist die gegenseitige Kompensation der Gütekriterien oft unerwünscht und unzulässig. In vielen Fällen ist es sinnvoll, eine Fuzzy-UND-Verknüpfung der Gütekriterien zu realisieren, wodurch eine Lösung entsteht, die alle Teilkriterien in etwa gleich gewichtet und pareto-optimal ist [2].

In diesem Beitrag wird daher ein Ansatz des Fuzzy Decision Making [4] vorgestellt, bei dem das gemeinsame Gütekriterium durch eine Fuzzy-UND-Verknüpfung der einzelnen Teilkriterien erfolgt. Der verwendete Algorithmus erlaubt eine transparente, nachvollziehbare Gewichtung der einzelnen Teilkriterien entsprechend ihrer Bedeutung. Angewendet wurde das fuzzy-basierte Entwurfskonzept auf die Regleroptimierung eines komplexen, stark gestörten Batchprozesses mit großen Messtotzeiten. Ein repräsentatives Ergebnis der fuzzy-basierten Regleroptimierung vermittelt die Abbildung. Durch den Einsatz dieses Regleroptimierungsverfahrens konnte die Inbetriebnahmezeit verkürzt und die Fertigungsqualität verbessert werden.

Fuzzy-Gütekriterien bei selektivem P&I-Regler (VZ2-Strecke, $T_{tot} = 235$ sec)

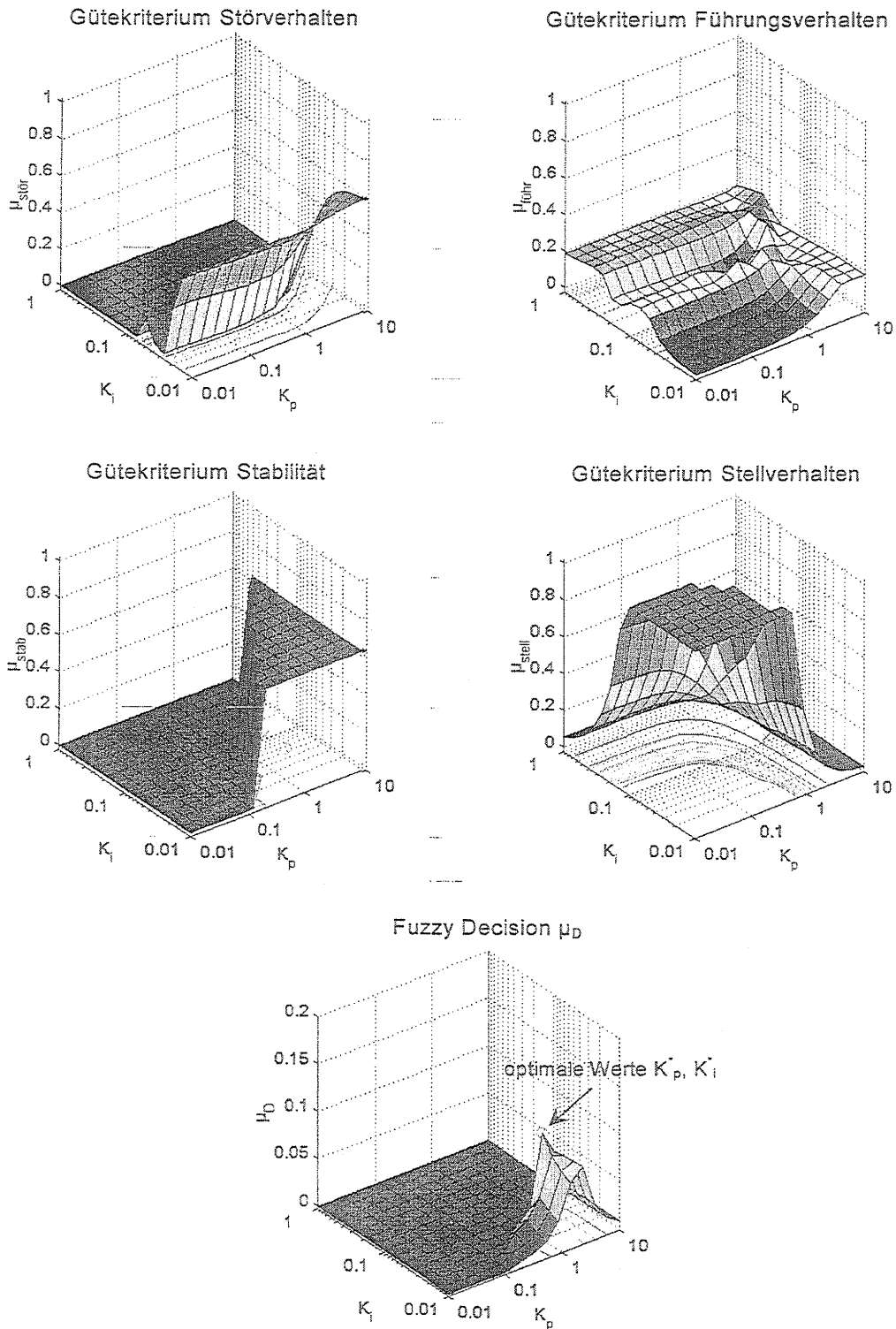


Abbildung: Optimierung eines Batchprozesses mit großer Messtotzeit ($T_{tot} = 235$ sec)

Literatur

- [1] Kreisselmeier, G; Steinhauser, R.: Systematische Auslegung von Reglern durch Optimierung eines vektoriiellen Gütekriteriums, Regelungstechnik 27, pp. 76-79, 1979
- [2] Ackermann, J.: Robuste Regelung. Springer, Heidelberg 1993
- [3] Kahlert, J.: Vektorielle Optimierung mit Evolutionsstrategien und Anwendungen in der Regelungstechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- [4] Bellman, R.E.; Zadeh, L.A.: Decision Making In A Fuzzy Environment, *Management Science*, 17 (1970), S. 141-163

Rekurrente Fuzzy-Systeme

R. Kempf

Institut für Automatisierungstechnik
Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik
Technischen Universität Darmstadt

Einleitung und Zielsetzung:

Klassische Fuzzy-Systeme besitzen entweder ein statisches Eingangs-/ Ausgangsverhalten (z.B. Mamdani) oder beschreiben ein dynamisches Verhalten in den Ausgangsgrößen (Takagi- Sugeno- Modelle). Dagegen sind Fuzzy-Systeme, die das Zeitverhalten interner Größen explizit durch Regeln beschreiben, ein neues Forschungsgebiet [1,2,6,7]. In diese Klasse reihen sich die aus [1] hervorgegangenen und hier vorgestellten rekurrenten Fuzzy-Systeme ein. Ziel dieses Beitrages ist es, rekurrente Fuzzy-Systeme zu erläutern, einige Eigenschaften zu beschreiben und Anwendungsfelder aufzuzeigen.

Motivation rekurrenter Fuzzy-Systeme:

Ausgangspunkt der Überlegung ist ein allgemeines nichtlineares zeitdiskretes System, wie in Abbildung 1 gezeigt. Dieses läßt sich durch folgende zwei Gleichungen beschreiben:

$$\underline{x}_{k+1} = f(\underline{x}_k, \underline{u}_k) \quad \text{und} \quad \underline{y}_{k+1} = g(\underline{x}_k, \underline{u}_k).$$

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Klassen dynamischer Systeme, die diese Gleichungen erfüllen. Sie unterscheiden sich in den Definitionsbereichen der Größen \underline{u} , \underline{x} und \underline{y} und den Eigenschaften der Funktionen f und g . Beispiele sind lineare Systeme, aber auch multilineare oder stückweise lineare Systeme. Wählt man für die Komponenten der Vektoren \underline{x} , \underline{u} und \underline{y} nur die Werte 0 oder 1 und setzt für die Funktionen f und g boolesche Logikfunktionen ein, so beschreibt das System einen booleschen Automat. Bei Verwendung mehrwertiger Logikfunktionen ergibt sich ein mehrwertiger Automat. Ein weiterer bekannter Vertreter solcher dynamischer Systeme, die sich durch eine Rückführung interner Größen auszeichnen, sind rekurrente Neuronale Netze.

Es stellt sich nun die Frage: Was erhält man, wenn man für f und g Fuzzy-Funktionen, bestehend aus Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung, einsetzt? Offensichtlich ergeben sich dann Fuzzy-Systeme mit Dynamik, bei denen x_i , u_i und y_i crisper Größen sind. In Analogie zu rekurrenten neuronalen Netzen, werden diese Systeme hier als rekurrente Fuzzy-Systeme bezeichnet.

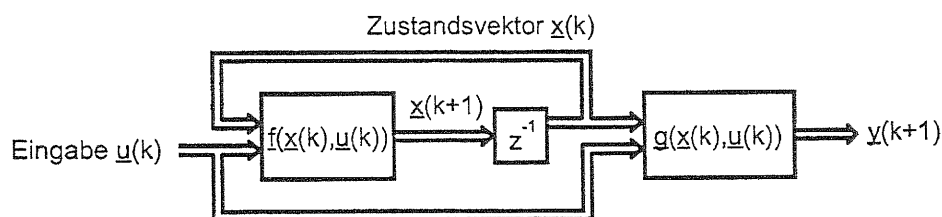


Abbildung 1: Allgemeiner Aufbau eines zeitdiskreten, dynamischen Systems.

Rekurrente Fuzzy-Systeme als Verallgemeinerung von Automaten:

Um einen Anhaltspunkt für die Untersuchung rekurrenter Fuzzy-Systeme zu erhalten, ist es sinnvoll, sich die Grundgedanken der Fuzzy-Logik vor Augen zu führen. So ist die Fuzzy-Logik eine Generalisierung der booleschen und mehrwertigen Logik. Analog sind rekurrente Fuzzy-Systeme eine Generalisierung dynamischer Systeme, die boolesche oder mehrwertige Funktionen verwenden, also eine Verallgemeinerung boolescher und mehrwertiger Automaten. Es stellt sich also die Frage, inwieweit rekurrente Fuzzy-Systeme Automaten-eigenschaften besitzen.

Als „automatenähnlich“ kann man ein rekurrentes Fuzzy-System bezeichnen, dessen Dynamik des Zustandsvektors \underline{x} maßgeblich durch die Transitionsregeln, bzw. durch einen Zustandsgraphen beschrieben wird. Das rekurrente Fuzzy-System verhält sich dann wie ein mehrwertiger Automat mit

dem Unterschied, daß die Zustandsgrößen und Transitionsfunktionen stetig sind. Aber nicht alle Auslegungen eines rekurrenten Fuzzy-Systems führen auch zu einem solchen automatenähnlichen Verhalten.

Damit „Automatenähnlichkeit“ gegeben ist, wählt man die Zugehörigkeitsfunktionen in der Fuzzifizierung als Trapeze, die sich zu Eins summieren und in der Defuzzifizierung Singletons. Als Inferenzoperatoren sind sum-prod und min-max möglich. Um dann garantieren zu können, daß sich das rekurrente Fuzzy-System „automatenähnlich“ verhält, reicht die folgende mit „Regelstetigkeit“ bezeichnete Eigenschaft der Regelbasis aus: Bei benachbarten Fuzzy-Eingaben muß jeder Fuzzy-Zustand auf benachbarte Fuzzy-Zustände abgebildet werden. Und bei gleicher Fuzzy-Eingabe sind benachbarte Fuzzy-Zustände nach der Abbildung auch weiterhin benachbart. Grundlagen für diese Aussagen sind in [3] zu finden.

Anwendungen:

Generell können rekurrente Fuzzy-Systeme auf einfache Art und Weise aufgebaut werden. Sie werden z.B. als sequentielle Mustererkenner zur Durchbruchfrüherkennung in Stranggießanlagen [1] eingesetzt. Die gleiche Methode wird in [5] zur Brand- und Gefahrenmeldung verwendet. Anwendungen als Expertensysteme sind auch denkbar. Weiterhin kann man sie als rekurrente Neuro-Fuzzy-Systeme auslegen, die eine Identifikation und Adaption anhand von Daten erlauben. Es lassen sich auch die elementaren dynamischen Einheiten, wie Integrierer und Differenzierer, mit rekurrenten Fuzzy-Systemen bilden [2]. Damit ist es auch möglich PID-Regler durch rekurrente Fuzzy-Systeme zu verwirklichen, um dann gezielt über die Regeln Nichtlinearitäten wie Anti-Wind-up-Reset, nichtlineare Kennlinien o.ä. einzubringen. In Abbildung 2 ist ein Ausschnitt der Regelbasis des Differenzierers in Form eines Zustandsgraphs aufgezeigt. Die unrunder Knoten sollen die Unschärfe der Fuzzy-Zustandsgrößen NB (negative big) bis PB (positive big) symbolisieren. Jeder Transitionspfeil entspricht jeweils einer Fuzzy-Regel für die Fuzzy-Transitionsfunktion f und für die Ausgabefunktion g .

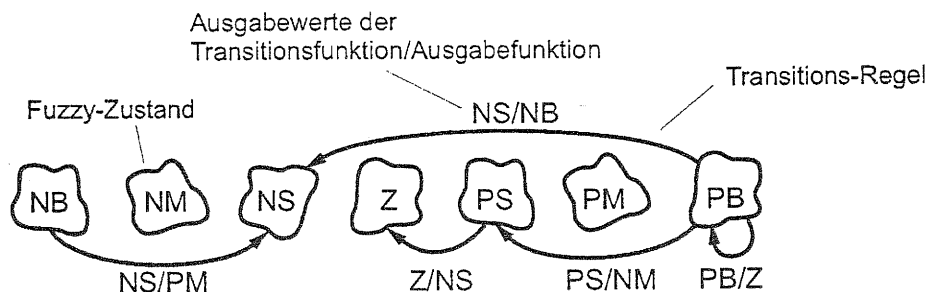


Abbildung 2: Teile eines Zustandsgraphs eines rekurrenten Fuzzy-Systems.

Ein weiteres Einsatzgebiet ist die qualitative Modellierung. So wird ein ähnlicher Ansatz in [4] zur Modellierung von Populationsdynamiken verwendet.

Literatur:

- [1] J. Adamy: Breakout Prediction for Continuous Casting by Fuzzy Mealy Automata, Proc. EUFIT 1995, pp. 754-759.
- [2] J. Adamy, A. Yousif: Regler mit zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelgliedern, Patentschrift DE 197 34 711 C1, 1999.
- [3] R. Kempf: On Ω -limit sets of discrete-time systems, eingereicht zur Veröffentlichung beim Journal of Difference Equations and Applications.
- [4] W. Bock, A. Salski: A fuzzy knowledge-based model of population dynamics of the Yellow-necked mouse (*Apodemus flavicollis*) in a beach forest. Ecol. Modelling 108 (1998), 155-161.
- [5] R. Engel, K. Henning: Sichere Brand- und Gefahrenmeldung mit Mehrfachsensor und Fuzzy-Logik, atp 41 (1999), pp. 39-43.
- [6] M. Kurano, M. Yasuda, J. Nakagami, Y. Yoshida: A limit theorem in some dynamic fuzzy systems, Fuzzy Sets and Systems, 51 (1992), pp. 83-88.
- [7] E. Schäfers, V. Krebs: Dynamic fuzzy-systems for qualitative process modeling: principles of a new system theory, at 47 (1999), pp. 382-389.

Vergleich unterschiedlicher neuronaler Regelungskonzepte am Beispiel eines nichtlinearen Temperaturregelungssystems.

Dipl. Ing. / LL.M Pat. Ing. D. Karimanzira
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Informatik and Automatisierung
Postfach 10 0565, 98684 Ilmenau
e-mail: divas.karimanzira@systemtechnik.tu-ilmenau.de

Die Fähigkeit neuronaler Netze, nichtlineare dynamische Systeme zu modellieren, hat zu einer Entwicklung vieler unterschiedlicher neuronaler Regelungskonzepte geführt. Die meisten dieser Regelungskonzepte sind Erweiterungen der schon existierenden linearen Techniken, wie zum Bsp. „Interne Modell Regelung“ und „Direkt Inverse Regelung“. Leider es gibt immer noch ungelöste Probleme zur Anwendung solcher Regelungsstrukturen. Zum Beispiel Stabilität und Robustheit kann nicht für viele dieser neuronalen Regelungskonzepte garantiert werden, insbesondere wenn der neuronale Regler direkt in der Rückkopplungsschleife erscheint. Ziel des vorliegenden Beitrages ist es, vergleichende Untersuchungen zur Eignung dieser Regelungsstrukturen am Beispiel eines nichtlinearen Temperaturregelungssystems vorzunehmen, um Aussagen über ihre Vor- und Nachteile sowie die sich daraus ergebenden Einsatzmöglichkeiten treffen zu können.

Das simulierte Regelungssystem wird durch folgendes mathematische Modell beschrieben:

$$y(t+1) = a(T)y(t) + \frac{b(T)}{1 + e^{0.5(y(t)-\gamma)}} * u(t) + [1 - a(T)]Y_0, \text{ mit } \alpha = 1.00151 * 10^{-4},$$

$$\beta = 8.67973 * 10^{-3}, \gamma = 40.00, Y_0 = 25^\circ\text{C}, a(T) = \exp(-\alpha T), b(T) = \frac{\alpha}{\beta} [1 - \exp(-\alpha T)].$$

Die Eingangsgröße des Systems ist durch 0V und 5V begrenzt und zusätzlich wird angenommen, daß die Tasterperiode durch $T \geq 10\text{sec.}$ begrenzt ist. Mit diesen ausgewählten Parametern, repräsentiert das System ein SISO Temperaturregelungssystem mit linearem Verhalten bis zu ungefähr 70°C und wird nichtlinear bis es erreicht Sättigung bei etwa 80°C .

In die Untersuchungen werden folgende neuronale Regelungsstrukturen einbezogen:

- Direkt Inverse Regelung (DIC),
- Interne Modell Regelung (IMC),
- Feedback-Error Regelung (FEC),
- Hierarchische Neuronale Netzwerk Regelung (HAC),
- Nichtlineare Neuronale Prädikative Regelung (NPC),
- Neuronale Feedback Linearisierung (FBL),
- Neuronale arbeitspunktabhängige Linearisierung (INL, APC),
- Optimal Control (OTC).

Die Untersuchungen konzentrieren sich für den Streckentyp bei stationären und instationären Systemeigenschaften auf folgende Schwerpunkte: Führungsverhalten, Störverhalten, Stabilitätseigenschaften, Robustheit gegen Systemparameteränderungen, Robustheit gegen variable Totzeiten. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß für die Neuronalen Regelungsstrukturen immer bessere Ergebnisse im Vergleich zum klassischen PID erreicht werden. Bei Störungen und Parameteränderungen im System zeigen das inverse Modell und prädikative Regler gutes Führungsverhalten wobei ihre Generalisierungsfähigkeit und on-line Lernen bzw. ihre Langzeitvorhersage hilft. Wie erwartet zeigt das NPC-Konzept das beste Ergebnis im Fall von variablen Totzeiten, aber nur wenn die Anzahl der geschätzten $B(z-1)$ -Parameter die möglichen Totzeiten abdeckt.

Sensor- und Navigationsdatenfusion für ein autonomes Fahrzeug

A. Simon, J. Becker und W. Schumacher

Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Braunschweig
Hans-Sommer-Str. 66
38106 Braunschweig
Email: a.simon@tu-bs.de

Schlüsselwörter: Autonomes Fahrzeug, Sensorfusion, Selbstlokalisierung

Systeme zur Fahrzeugführung sind in letzter Zeit zum Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten geworden. Ergebnisse dieser Arbeiten, wie z.B. ABS, ASR oder ACC fließen bereits heute als Fahrerassistenzsysteme in die kommerzielle Fahrzeugproduktion ein. Als visionäres Ziel dieser Forschungsaktivitäten kann ein vollkommen autonom fahrendes Fahrzeug angesehen werden. Eine Übersicht über unterschiedliche Ansätze, die zu diesem Ziel führen sollen, wird in [2] sowie in [5] gegeben. Zukünftige komplexe Fahrerassistenzsysteme benötigen eine große Anzahl verschiedener Sensoren für die Umgebungserfassung. Während heute einzelne Assistenzsysteme ihre eigene Sensorik verwenden, wird zunehmend die Vernetzung der Sensorinformationen an Bedeutung gewinnen. Die somit notwendige Sensorfusion kann für verschiedene Aufgabenbereiche, wie z.B. Hinderniserkennung oder Selbstlokalisierung unterschiedlich ausgelegt sein. Um derartige Zusammenhänge anwendungsnah untersuchen zu können, wurde zur Automatisierung der Dauererprobung von Kraftfahrzeugen ein modulares System entwickelt, durch welches nach kurzer Einrüstzeit unterschiedlichste Serienfahrzeuge in autonome Fahrzeuge verwandelt werden können. Das mittelfristige Ziel war es, Serienfahrzeuge autonom auf einem vorgegebenen Kurs fahren zu lassen, um reproduzierbare Testergebnisse ohne Fahrereinfluss zu erhalten [4]. In diesem System wurde ein unidirektionaler Informationsfluss von den verschiedenen Sensoren bis hin zur Aktorik realisiert, welcher über die Fahrzeugumgebung und Aktuatorsignale rückgekoppelt ist (Abb. 1). Die verwendete Sensorik gliedert sich in einen positionsgebenden und einen objekterkennenden Teil. Zur Bestimmung der Eigenposition wurde bislang in erster Linie eine Präzisionsortung bestehend aus DGPS und einer Inertialplattform verwendet. Da die Verfügbarkeit von DGPS aufgrund auftretender Satellitenabschattungen jedoch oftmals eingeschränkt ist, wird die Eigenposition des Fahrzeugs zusätzlich durch Hinzunahme weiterer Umgebungsinformationen, die ohnehin im Fahrzeug vorhanden sind gestützt. Dies geschieht durch Auswertung der relativen Objektbewegungen und des Objekttrackings der objekterkennenden Sensoren sowie durch Verwendung einer videobasierten Fahrbahnranderkennung in Verbindung mit einer digitalen Karte [1]. Spezielle Aspekte der hochgenauen Navigation, besonders der Satellitennavigation werden u.a. in [3] behandelt. Neben der Selbstlokalisierung kommt bei der Navigation autonomer Fahrzeuge der Kollisionsvermeidung große Bedeutung zu. In dem hier vorgestellten Projekt werden Hindernisse und Objekte in der Fahrzeugumgebung durch mehrere Laserscanner, einen Radarsensor und ebenfalls durch den Video-Sensor erkannt und durch eine Sensorfusion zu einem einheitlichen Abbild der Fahrzeugumgebung fusioniert. Mit diesen Informationen einschließlich der digitalen Karte wird ein Fahrkorridor generiert, in dem die Idealbahn und Geschwindigkeit des Fahrzeugs geplant wird. Durch einen heuristischen Algorithmus wird die Idealbahn in Echtzeit

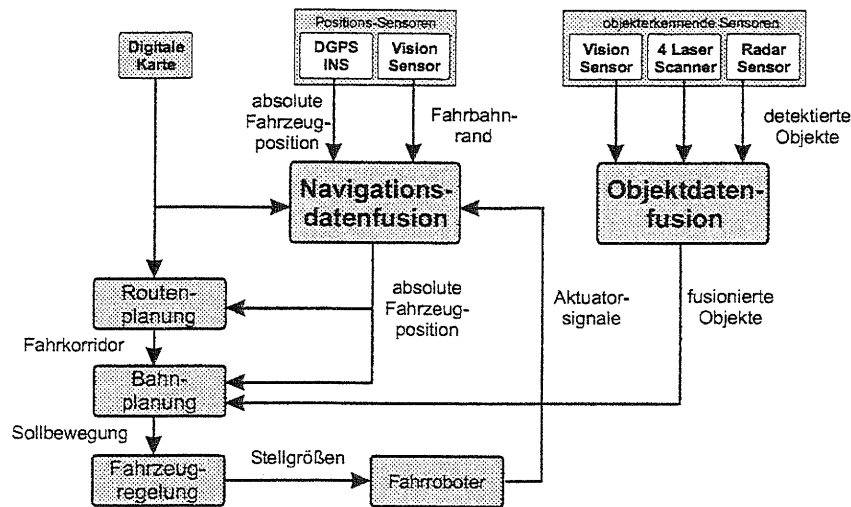


Abbildung 1: Übersicht über die Fahrzeugführung

als Béziérspline geplant. Dazu werden die den Spline charakterisierenden Béziérpunkte im Fahrkorridor ermittelt. Um auf von den Sensoren neu detektierte Hindernisse reagieren zu können, wird von dieser Idealbewegung abgewichen, indem spezielle Fahrmanöver als Differenzbewegung zur Idealbahn geplant werden. Das Ergebnis ist die Sollbewegung des Fahrzeugs, welche von der Fahrzeugregelung in Stellgrößen für die Aktorik umgesetzt wird. Um keine baulichen Veränderungen im Fahrzeug vornehmen zu müssen, ist die Aktorik als Fahrroboter realisiert, welcher vom Fahrersitz aus über das Lenkrad und die Fahrpedale das Fahrzeug steuert.

Literatur

- [1] *Becker, J. und Simon, A.:* Sensor and Navigation Data Fusion for an Autonomous Vehicle. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000. Dearborn (MI), USA, 3-5 Okt. 2000.
- [2] *Bishop, R.:* A Survey of Intelligent Vehicle Applications Worldwide. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000. Dearborn (MI), USA, 3-5 Okt. 2000.
- [3] *Linkwitz, K. und Hangleiter, U.:* High Precision Navigation 95. Proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation. University of Stuttgart. Dümmler Verlag, Bonn, 1995.
- [4] *Simon, A.; Söhnitz, I.; Becker, J. und Schumacher, W.:* Navigation and Control of an Autonomous Vehicle. 9th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems. Braunschweig, 13-15 Juni 2000.
- [5] *Zhao, Y.:* Vehicle Location and Navigation Systems. Artech House 1997.

Bildgestützte Bewegungsanalyse mittels optischer Korrelation zur bordautonomen Navigation von Satelliten

S. Dyblenko

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik (Prof. K. Janschek)
Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik
D-01065 Dresden
Tel.: ++49-351-463-2134, Fax: 0++49-351-463-7039
e-mail: dyblenko@ifa.et.tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Echtzeitbildverarbeitung, Optischer Korrelator, bildgestützte Navigation.

Bordautonome Navigation in Form der "Bereitstellung von Schätzwerten der aktuellen Bahn (Position, Geschwindigkeit) und Lage (Orientierung) des Satelliten ohne Nutzung externer kooperativer Systeme" ist eine Grundfunktion für den autonomen Betrieb von Satelliten. Diese Betriebsautonomie ist in erster Linie gefordert, um die Betriebskosten klein zu halten. Bei interplanetaren Missionen ist sie aber wegen Kontaktlücken und sehr langen Signallaufzeiten sogar eine notwendige Voraussetzung zur Missionserfüllung.

Die heute für Erdsatelliten vielfach genutzte Technologie der Satellitennavigation (z.B. GPS – Global Positioning System [1]) ist weder wirklich bordautonom, da sie ja kooperative Navigationssatelliten benötigt, noch für interplanetare Missionen geeignet.

Als beste autonome Orientierungshilfe bieten sich die natürlichen Objekte unseres Sonnensystems an. Für Satelliten auf Umlaufbahnen ist dabei die Oberfläche des umflogenen Zentralkörpers eine nahe liegende und vielversprechende Informationsquelle zur Lösung der Navigationsaufgabe.

Bekannte oberflächenbasierte Verfahren stützten sich dabei auf *bildgebende Sensoren* (Satellitenkameras) und das Prinzip der Navigation mittels *Landmarken* [1]. Nachteilige Eigenschaften dieser Verfahren sind der große bordseitige a-priori Datenbedarf an Landmarken (Referenzbilder, digitale Karten), die Empfindlichkeit der Merkmalerkennung auf Bildstörungen durch wechselnde Beleuchtung, Jahreszeiten oder Wolkenbedeckung und die undefinierte Verfügbarkeit von Landmarken durch Bewölkung. Aus den genannten Gründen ist mit diesen Verfahren eine Lösung der Navigationsaufgabe prinzipiell nur durch den Einsatz von Schätzfiltern möglich, wobei die erreichbaren Systemleistungen (Genauigkeiten, Einschwingzeiten) ohne zusätzliche Informationsquellen (Datenfusion) für die meisten Anwendungsfälle unzureichend bleiben [1].

Im vorliegenden Beitrag wird ein alternatives bildgestütztes Navigationskonzept auf der Basis einer neuartigen *echtzeitfähigen opto-elektronischen Bewegungsanalyse* vorgestellt, das viele genannte Nachteile der Landmarkennavigation vermeidet.

Das vorgestellte Verfahren basiert auf der Analyse von *Bewegungsvektoren* in der Bildebene durch Auswerten von *Bildsequenzen* der Kamerabilder (Abb.1). Die Ermittlung der Bewegungsvektoren erfolgt mittels *2-dimensionaler Korrelationsanalyse* und ermöglicht Korrelationsgenauigkeiten im Subpixelbereich. Der entscheidende Vorteil von spektralen Bildverarbeitungsmethoden liegt bekanntermaßen in der weitgehenden Unabhängigkeit von einzelnen Bildmerkmalen, von Bedeutung ist vielmehr die Gesamtheit (Textur) der Bildinformation (im Gegensatz zu Landmarkenverfahren). Damit sind Korrelationsverfahren extrem robust gegenüber Unbestimmtheiten und Störungen der zugrunde liegenden Bilder.

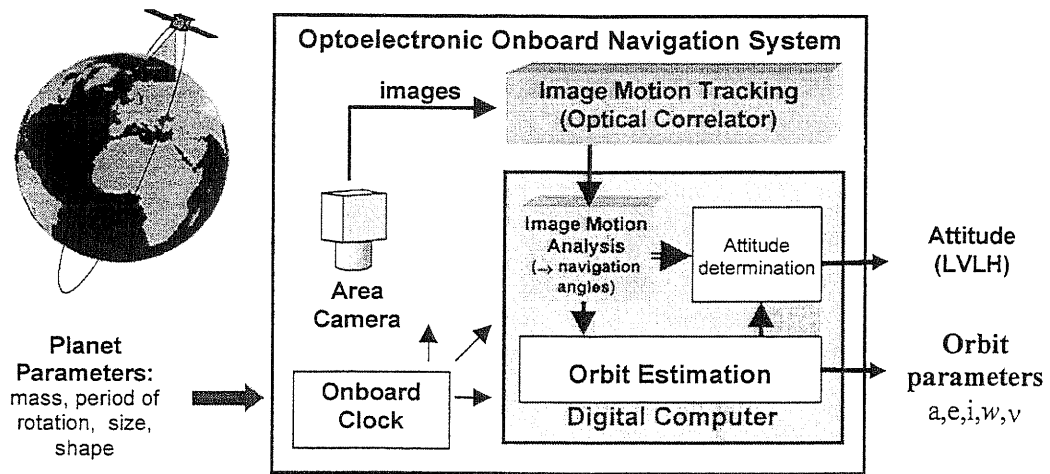


Abb. 1: Struktur des opto-elektronischen Navigationssystems

Da das vorgestellte Verfahren ausschließlich Bildsequenzen ohne explizite Zuordnung von Bildinhalten (Einzelmerkmale) nutzt, werden insbesondere *keine a-priori Oberflächendaten* (z.B. Merkmale, Texturen) und damit *keine bordseitigen Bilddatenbanken* benötigt.

Den genannten methodischen Vorteilen der Korrelationstechniken steht allerdings deren großer Rechenaufwand gegenüber, der viele Echtzeitanwendungen (speziell zur 2-dimensionalen Korrelation) verhindert.

Diese technologischen Einschränkungen werden in der vorgestellten Lösung durch den Einsatz einer am Lehrstuhl für Automatisierungstechnik entwickelten speziellen optoelektronischen Recheneinheit in Form eines *Optischen Korrelators* umgangen (Joint Transform Correlator, als Labormodell verfügbar [2], [3], [4]).

Optische Korrelatoren nutzen Interferenzeigenschaften spezieller optischer Anordnungen zur optischen Fouriertransformation von transparenten Bildern (Optical Fourier Processor [5]) und ermöglichen dadurch entscheidende Geschwindigkeitsvorteile gegenüber rein digitalen Korrelatoren (typisch um den Faktor 10 schneller als Digitale Signalprozessoren).

Die Kombination der vorgeschlagenen korrelationsbasierten Bewegungsanalyse mit einem optischen Korrelator ermöglicht nun deutlich *verbesserte Navigationssystemleistungen* bei *minimalem a-priori Systemwissen* gegenüber landmarkenbasierten Konzepten. Neben den wesentlichen Bahnparametern kann auch die Lage (Orientierung) des Satelliten [6] mit höherer Genauigkeit und bedeutend kürzeren Einschwingzeiten (innerhalb eines Umlaufes bei unbekanntem Anfangswerten) geschätzt werden.

Literatur:

- [1] Janschek, K., Boge, T., Krasilshikov, M., Jacobson, M.: Data fusion based navigation concept for LEO satellites. Proceedings of the 4th ESA International Conference on Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems, , 18-21 October 1999, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp.517-522.
- [2] Janschek, K., Kusimov, S., Sultanov, A., Tchernykh, V., Dyblenko, S.: Optical Correlator for Onboard Autonomous Control of Earth Observation Camera Pointing. Digest of the 2nd International Symposium of the International Academy of Astronautics (IAA) Small Satellites for Earth Observation, Berlin, April 12 – 16, 1999. Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, 1999. Paper IAA-B2-0907P, pp.231-234.
- [3] Tchernykh, V., Janschek, K., Dyblenko, S.: Space application of a self-calibrating optical processor for harsh mechanical environment. Preprints of the 1st IFAC –Conference on Mechatronic Systems, 18-20 Sept. 2000, Darmstadt, Germany, pp.317-322.
- [4] Summary Report, European Space Agency ESA/ESTEC Contract No.13639/99/NL/MV. Optical Correlator for Camera Pointing Recording”, 2000.
- [5] Yu, T.S.; Yang, X.: Introduction to Optical Engineering. Cambridge University Press. 1997.
- [6] Janschek, K., Boge, T., Tchernykh, V., Dyblenko, S.: Image Based Attitude Determination using an Optical Correlator. Proceedings of the 4th ESA International Conference on Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems, 1999, Noordwijk, The Netherlands, pp. 487-492.

Agentenorientierte Systemarchitektur für einen Rehabilitationsroboter

Dipl. Ing. Christian Martens

Institut für Automatisierungstechnik
Universität Bremen
Kufsteinerstr. NW1
Tel.: +49/218/3217
Fax: +49/218/4596
Email: cmartens@iat.uni-bremen.de

Prof. Dr.-Ing. Axel Gräser

Institut für Automatisierungstechnik
Universität Bremen
Kufsteinerstr. NW1
Tel.: +49/218/7326
Fax: +49/218/4596
Email: ag@iat.uni-bremen.de

Schlüsselwörter: Software-Technik, Softwareagenten, hybride Mehrschichtenarchitektur, Rehabilitationsrobotik

Automatisierungssysteme für komplexe technische Anwendungen, wie Fertigungsstraßen, Flugüberwachungs- oder Logistiksysteme, sollen gleichzeitig hohe Anforderungen nach Flexibilität, Robustheit und Wiederverwendbarkeit erfüllen. Dazu sind neue Methoden der Software-Technik erforderlich. Hier haben sich seit Anfang der 90er Jahre immer stärker Softwareagenten durchgesetzt, die einen Lösungsansatz zur Beherrschung der genannten Systeme versprechen. Dabei ist der Begriff des Softwareagenten zur Zeit noch nicht genau definiert und wird in verschiedenen Zusammenhängen unterschiedlich benutzt. Als grobe Charakterisierung ist unter einem Softwareagenten ein Programmstück zu verstehen, welches im fremden Auftrag eigenständig handelt [1]. Diese grobe Charakterisierung begegnet dem Wunsch nach autonomen Programmelementen, die flexibel auf Ereignisse in der Umgebung reagieren, eigenständig Entscheidungen treffen und in zielgerichteter Weise miteinander interagieren können. So wird beispielsweise im Rahmen der verteilten künstlichen Intelligenz die Umsetzung dezentraler Planungsmethoden in sogenannten Multi-Agenten-Systemen (MAS) untersucht. Mit Hilfe lokal vorhandener Detailinformation und global festgelegter Aufgabenstellungen werden im Verbund ganze Handlungsketten geplant und zur Ausführung gebracht [2].

Dieser makroskopischen Sichtweise, die sich in dem Begriff MAS widerspiegelt, steht die mikroskopische Sichtweise entgegen, die sich mit der Kontrollarchitektur eines einzelnen Agenten beschäftigt. Aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) stehen hierfür zwei diametral zueinander stehende Ansätze zur Verfügung: Die im Bereich der klassischen KI einzuordnenden *deliberativen* Agenten, die über ein internes Modell der Umwelt verfügen, sind in der Lage Handlungen zur Erreichung eines vorgegebenen Zieles zu planen. Diese Agentenart leidet aber unter dem Problem der kombinatorischen Explosion bei der Planerstellung, womit sich ihr Einsatz in dynamischen und komplexen Umgebungen nicht bewährt hat. Hier setzen die sogenannten *reaktiven* Agenten an, die aufgrund einer engen Sensor-Aktor-Kopplung in Echtzeit auf Änderungen der Umwelt reagieren können. Diese als verhaltensbasiert bezeichneten Systeme sind aber bis zum jetzigen Zeitpunkt über das Aufsammeln von Blechdosen nicht hinaus gekommen [3]. Eine Verknüpfung beider Agentenarten zu sogenannten *hybriden* Agenten verbindet deren Vorteile und reduziert deren Nachteile.

Da aus der Sicht der Automatisierungstechnik deliberative Strukturen Steuerungen und reaktive Strukturen Regelungen darstellen, ist für es für diesen Bereich von Interesse, welche Architekturen von der Agententechnologie bereitgestellt werden, mit denen komplexe Steuerungs- und Regelungssysteme organisiert werden können [4]. Im Bereich der autonomen Roboter werden hierfür häufig die hybriden Agenten. Die Strukturierung der Funktionalität dieser Agentenart erfolgt über mehrere interagierende Ebenen. Die unterste Ebene, welche die Ankopplung des Systems an die Sensoren und Aktoren ermöglicht, stellt den reaktiven Teil

des Agenten dar. In dieser Ebene werden echtzeitfähige Verhaltensmuster bereitgestellt (geschlossene Regelkreise), die der nachfolgenden Ebene als elementare diskrete Operatoren zur Verfügung stehen. Auf Basis dieser Operatoren kann die höher liegende Ebene komplexere Handlungen planen (Steuerungsebene bzw. deliberative Ebene). Dieses allgemeine Prinzip eines hybriden Agenten wurde bereits in mehreren Architekturen umgesetzt und praktisch angewendet (z. B. 3T [5], INTERRAP [6], SMARTSOFT [7]).

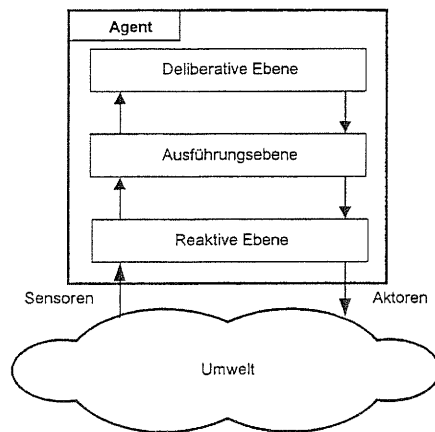


Abbildung 1: Hybride Mehrschichtenarchitektur

In diesem Bericht wird die am Institut für Automatisierungstechnik (IAT) der Universität Bremen entwickelte hybride Agentenarchitektur zur Steuerung eines Rehabilitationsroboters vorgestellt. Das direkte Zusammenarbeiten mit einem behinderten Menschen, die hohe Anzahl von Aktoren und Sensoren, das Agieren des Roboters in einer menschengerechten und damit variablen Umgebung, sowie der Wunsch Befehle auf hohem Abstraktionsniveau zur eigenständigen Bearbeitung an das Robotersystem abzugeben, belegen die Notwendigkeit dieser Softwarearchitektur. Ausgehend von den allgemeinen Anforderungen an einen Rehabilitationsroboter wird der durchgeführte Entwurf der Architektur schrittweise erläutert. Anhand der Integration eines visuell gestützten Greifvorganges in den am IAT entwickelten Rehabilitationsroboter FRIEND wird der Umgang mit dieser Architektur aus Sicht der Entwickler veranschaulicht.

weise erläutert. Anhand der Integration eines visuell gestützten Greifvorganges in den am IAT entwickelten Rehabilitationsroboter FRIEND wird der Umgang mit dieser Architektur aus Sicht der Entwickler veranschaulicht.

Literatur:

- [1] Burkhard, H. D. "Einführung in die Agenten-Technologie" it + ti – Informationstechnik und Technische Informatik, R. Oldenbourg Verlag, Heft 4/98
- [2] Brenner, W.; Wittig, H.; Zarnkow, R. "Intelligente Softwareagenten – Grundlagen und Anwendungen" Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997; ISBN: 3540634312
- [3] Müller, J. "Kontrollarchitekturen für autonome kooperierende Agenten" it + ti – Informationstechnik und Technische Informatik, R. Oldenbourg Verlag, Heft 4/98
- [4] Gräser, A. "Agenten – Ein Konstrukt der Informatik betrachtet aus der Sicht der Automatisierungstechnik" In B. Lohmann, A. Gräser (Hrsg.), Methoden und Anwendungen der Automatisierungstechnik, Shaker Verlag 1999, ISBN 3-8265-6093-0
- [5] Bonasso, R.P.; Firby, R. J.; Gat, E.; Kortenkamp, D.; Miller, D. P.; Slack, M. G. "Experiences with an Architecture for Intelligent Reactive Agents" in Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 9(1) 1997
- [6] Müller, J. "The Design of Intelligent Agents – A Layered Approach" Springer Verlag 1996, ISBN 3-540-62003-6
- [7] Schlegel C., Wörz R. "SMARTSOFT leichtgemacht – Integration symbolischer und subsymbolischer Informationsverarbeitung in adaptiven sensomotorischen Systemen" Teilprojekt C3 FAW Ulm SFB 527 Report 1999/14

Einordnung von Fahrdynamik-Regelungen in das Referenzmodell der Fahrzeugautomatisierung

Lothar Ganzelmeier, Jörg Helbig, Eckehard Schnieder
 Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik
 Technische Universität Braunschweig
 Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig
 j.helbig@tu-bs.de

Der Bereich Fahrzeugautomatisierung hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Um die zum Teil inkonsistente Begriffswelt in diesem Bereich zu überwinden wird aus dem anwendungsneutralen Vier-Ebenen-Modell [Erdmann et al. 94] ein Ebenenmodell für die Fahrzeugautomatisierung abgeleitet.

Basierend auf einer funktionalen Strukturierung lassen sich Systeme gemäß Abb. 1 in die strategische, dispositive, taktische und operative Ebene einteilen. Jede dieser Ebenen enthält Teilfunktionen, die mit den jeweils benachbarten Ebenen kooperieren.

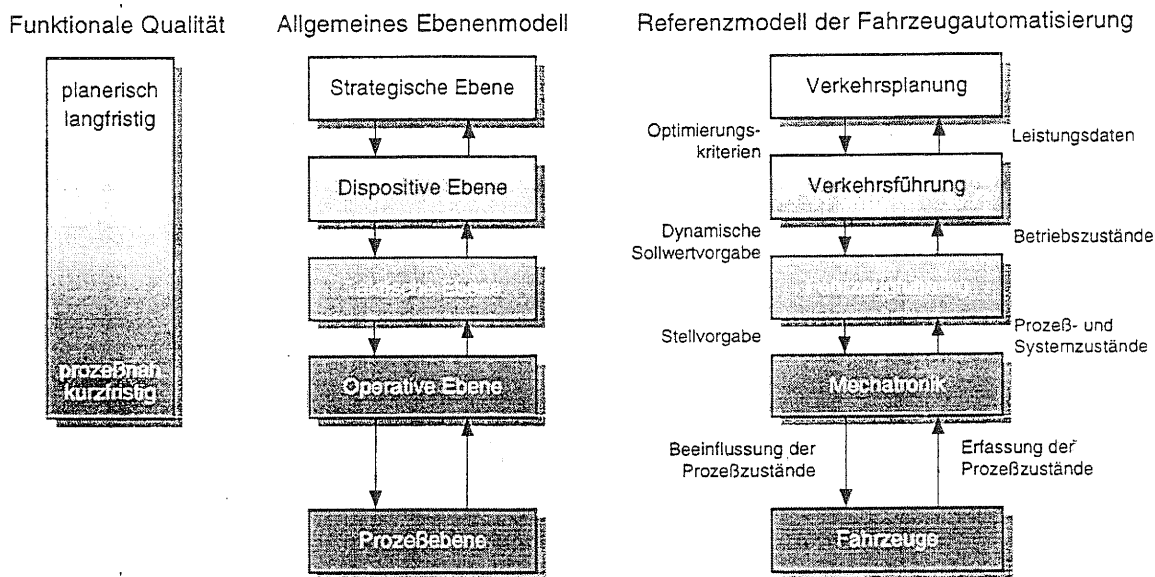


Abbildung 1: Das Referenzmodell der Fahrzeugautomatisierung

Die **strategische Ebene** enthält alle informellen Funktionen, um die langfristigen Zielvorgaben für das Gesamtsystem zu definieren. Im spezifischen Ebenenmodell der Fahrzeugautomatisierung werden diese strategischen Funktionen durch die

Verkehrsplanungs-Ebene repräsentiert. Unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten wird in dieser die langfristige Mobilitätsplanung durchgeführt.

Die **dispositive Ebene** stellt technische und betriebswirtschaftliche Funktionen bereit, um die Zielvorgaben der strategischen Ebene in detaillierte Anweisungen für die unterlagerte Ebene umzusetzen. In der Fahrzeugautomatisierung entspricht dies der **Verkehrsführungs-Ebene**, in der die globalen Optimierungskriterien der Verkehrsplanung in dynamische Sollwertvorgaben für die einzelnen Fahrzeuge umgesetzt werden.

Die **taktische Ebene** enthält sämtliche Funktionen zur Führung des Prozesses. Im Ebenenmodell der Fahrzeugautomatisierung entspricht dies der **Fahrzeugführungs-Ebene**. Alle Funktionen zur Unterstützung des Fahrvorganges bis hin zur autonomen Fahrzeugführung sind Bestandteil dieser Ebene. Eine Verfeinerung kann entsprechend des Dekompositionsprinzipes allgemein [Naab 2000] oder auch projektspezifisch [Dickmanns/Maurer 99] vorgenommen werden.

Die **operative Ebene** enthält alle Funktionen zur Beeinflussung und Erfassung der Prozesszustände. In der Fahrzeugautomatisierung ist dies die prozessnahe funktionale Integration von Mechanik, Elektronik und Informatik. Beispiele für Funktionen der **Mechatronik-Ebene** sind selektive Bremsaktionen, Raddrehzahlmessung und Einspritzmengendosierung.

In dem Vortrag wird das Ebenenmodell der Fahrzeugautomatisierung erläutert. Die Fahrzeugführungs- und die Mechatronik-Ebene werden exemplarisch herausgegriffen und anhand praktischer Beispiele diskutiert. Darüber hinaus erfolgt ein Ausblick auf eine mögliche Realisierung der Verkehrsführungs-Ebene.

Literaturverzeichnis

- [Dickmanns/Maurer 99] Dickmanns, E.D., Maurer, M.: *Eine Systemarchitektur für sehende autonome Straßenfahrzeuge*, at - Automatisierungstechnik 2/1999
- [Erdmann et al. 94] Erdmann, L., Schielke, A.G., Schnieder, E.: *Referenzmodell zur Strukturierung von Leitsystemen*, at - Automatisierungstechnik 5/1994
- [Naab 2000] Naab, Karl: *Automatisierung bei der Fahrzeugführung im Straßenverkehr*, at - Automatisierungstechnik 5/2000
- [Schnieder 99] Schnieder, Eckehard: *Methoden der Automatisierung*, Vieweg - Verlag, 1999

Reglerentwurf mit konvexer Programmierung – ein Vergleich

M. Horn*

* Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Graz
Inffeldgasse 16c, A-8010 Graz
Tel.: +43/316/873-7021
Fax: +43/316/873-7028

Email: horn@irt.tu-graz.ac.at

Schlüsselwörter: Semidefinite Programmierung, Lineare Programmierung, Mehrgrößenregelkreis

In diesem Beitrag werden zwei verschiedene Ansätze zum Entwurf zeitdiskreter Regler für Mehrgrößensysteme präsentiert. Die vorgestellten Syntheseverfahren beruhen auf Methoden der linearen bzw. semidefiniten Programmierung und ermöglichen es, sogenannte harte Beschränkungen gewisser Systemgrößen bereits beim Entwurf zu berücksichtigen. Die den Entwurfsverfahren zugrundeliegende Regelkreisstruktur ist in Abbildung 1 dargestellt. Der

gesuchte Regler soll den Regelkreis nicht nur stabilisieren, sondern unter Ausnutzung von Vorabinformationen über die Eingangsgröße w auch gewährleisten, daß der Regelfehler e unter Berücksichtigung harter Beschränkungen für die Systemgrößen z in einem gewissen Sinne minimiert wird. Durch Einführung geeigneter Vektor- und Systemnormen kann das Entwurfsproblem auf geradlinige Weise als lineares Programm (d.h. lineare Zielfunktion mit linearen Nebenbedingungen) bzw. als semidefinites Programm (d.h. lineare Zielfunktion mit linearen Matrizenungleichungen als Nebenbedingungen) formuliert werden. Die praktische Lösung dieser Optimierungsprobleme ist mit einer Reihe von Schwierigkeiten verbunden, denen einerseits durch den Einsatz geeigneter Softwarewerkzeuge, andererseits durch die Entwicklung numerisch zuverlässiger Algorithmen entgegengetreten werden kann. Anhand eines ausführlichen Beispiels wird die Anwendbarkeit der beiden Verfahren demonstriert und die erzielten Ergebnisse werden gegenübergestellt.

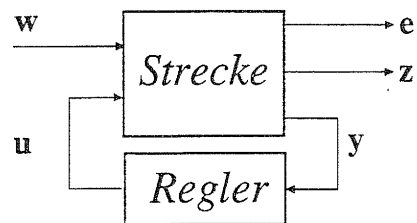


Abbildung 1: Regelkreisstruktur

Literatur:

- [1] Desoer C.A.; Vidyasagar M.: feedback systems: input-output properties, Academic Press NY, 1975
- [2] Dahleh, M.; Diaz-Bobillo, I.: Control of Uncertain Systems, Prentice Hall, 1995
- [3] Horn, M.: LinQua - Ein Werkzeug zum rechnerunterstützten Entwurf linearer Regelkreise, Dissertation, Technische Universität Graz, 1998
- [4] Horn, M.; Hofer, A.: Computer Aided Control System Design for Multivariable Systems with Saturations, Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, 2000, Anchorage, USA

Reglerentwurf für Regelkreise in Feldbussystemen

Thomas Eymann

Univ. Prof. Dr.-Ing. R. Tracht

Fachgebiet Automatisierungstechnik
Universität GH Essen

Fachgebiet Automatisierungstechnik
Universität GH Essen

Fachbereich Maschinenwesen
Schützenbahn 70, 45117 Essen

Fachbereich Maschinenwesen
Schützenbahn 70, 45117 Essen

Tel.: +49 201/183-3769

Tel.: +49 201/183-2945

Email: eymann@automat.uni-essen.de

Email: tracht@automat.uni-essen.de

Schlüsselwörter: dezentrale Automatisierung, Feldbus, variable Totzeit, Reglerentwurf, Riccati-Regler, lineare Matrix Ungleichung, algebraische Matrix Ungleichung.

In der dezentralen Automatisierungstechnik haben sich die seriellen Feldbusse - z.B. CAN, Profibus-DP, Interbus-S oder Industrial-Ethernet - etabliert. Zunehmend wird die Feldbustechnik nicht nur für die Steuerung von technischen Prozessen genutzt, sondern auch für die Regelung der Prozesse. Der Regelkreis besteht in diesem Fall aus den Standardkomponenten Regler, Sensoren und Aktuatoren und der neuen Systemkomponente Feldbus. Das Zeitverhalten des Feldbussystems kann durch ein zeitvariantes Totzeitglied beschrieben werden. Dieses Totzeitglied verändert das dynamische Verhalten der Regelstrecke. Im worst case kann dies zu einem instabilen System führen. D.h. wird die Feldbustechnik eingesetzt, muss ein Reglerentwurfverfahren eingesetzt werden, das die variable Totzeit $\eta(t)$ berücksichtigt, die durch die serielle Datenübertragung der Prozessvariablen entsteht. Die variable Totzeit $\eta(t)$ ist a priori nicht bekannt, es lässt sich aber eine obere Schranke angeben. Die zeitliche Ableitung der Totzeit $\dot{\eta}(t)$ muss ebenfalls beschränkt sein. Basierend auf der Zustandsraumdarstellung von linearen dynamischen Systemen

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t - \eta(t)) \quad (1)$$

wird ein neues Reglerentwurfverfahren für Regler mit vollständiger Zustandsrückführung $\mathbf{u}(t) = -\mathbf{F}\mathbf{x}(t)$ vorgestellt, das zu einem garantiert stabilen geschlossenen Regelkreis im Feldbussystem führt.

In den letzten Jahren sind einige Verfahren zur Reglersynthese entwickelt worden, um in Regelkreisen den Einfluss von Feldbussen zu berücksichtigen. Zunächst sind die Methoden zu nennen, die die Prozessgrößen mit einem Zeitstempel versehen und bei der Weiterverarbeitung die Zeitinformation zur Prädiktion nutzen (z.B. CANopen oder [4][3]). Dies erfordert die Einführung einer synchronisierten, für alle Netzknoten gültigen Uhrzeit, wodurch sich die zu Verfügung stehende Übertragungsbandbreite reduziert und der gerätetechnische Aufwand erhöht wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Regeln, die ein deterministisches Verhalten bezüglich der Datenübertragung ermöglicht, z.B. TT-CAN oder TTP/C. Auch hier wird ein globaler Synchronisationsmechanismus benötigt, der einen erhöhten administrativen Aufwand bei der Datenübertragung zur Folge hat. Mit den Methoden der Robusten Regelung sind weitere Ansätze entwickelt worden, die es erlauben, Parameterunsicherheiten und zeitvariante sowie zeitinvariante Totzeiten der Regelstrecke im Reglerentwurf zu berücksichtigen [1] [5].

Der im Folgenden vorgestellte Lösungsansatz basiert auf der Theorie der retardierenden funktionalen Differentialgleichungen [2]. Allgemein kann die Stabilität

von linearen dynamischen Systemen mit der Methode von Ljapunow untersucht werden. Um die Ljapunow Methode auf Totzeitsysteme anwenden zu können, muss diese mit dem Ansatz von Krasovskii erweitert werden [5]. Das Ergebnis ist:

Das lineare zeitinvariante dynamische System (1) mit der variablen Totzeit $\eta(t) \leq \eta^$ und $0 \leq \dot{\eta}(t) \leq \dot{\eta}^* < \frac{1}{2}$, ist durch den Zustandsregler mit vollständiger Zustandsrückführung $u(t) = -Fx(t)$ stabilisierbar, wenn eine Matrix $0 < X = X^T$ und die skalaren Größen $\alpha > 0$ und $\beta > 0$ existieren, so dass die algebraische Riccati Ungleichung*

$$\mathbf{x}^T(t) \left(\begin{array}{c} (\mathbf{A} - \mathbf{BF})\mathbf{X} + \mathbf{X}(\mathbf{A} - \mathbf{BF})^T \\ + \eta^* \left(\frac{\alpha}{(1-2\dot{\eta}^*)} + \frac{\beta}{(1-2\dot{\eta}^* + (\dot{\eta}^*)^2)} \right) \mathbf{BFF}^T\mathbf{B}^T \\ + \alpha^{-1}\eta^*\mathbf{X}\mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{X} + 2\beta^{-1}\eta^*\mathbf{X}\mathbf{F}^T\mathbf{B}^T\mathbf{B}\mathbf{F}\mathbf{X} \end{array} \right) \mathbf{x}(t) < 0 \quad (2)$$

erfüllt ist. Außerdem muss das dynamische System (1) steuerbar sein und die Eigenwerte im Intervall $\lambda(\mathbf{A} - \mathbf{BF}) \in C^-$ liegen.

Ein numerischer Ansatz zur Lösung der algebraischen Riccati Ungleichungen ist die Methode der linearen Matrix Ungleichung. Zur Lösung von Gleichungen dieses Typs existieren verschiedene Softwaretools, unter anderem auch für das Numerik-Programm Matlab (LMI-Toolbox). Die Überführung der algebraischen Riccati Ungleichung in eine lineare Matrix Ungleichung erfolgt durch die Anwendung des Schur Komplements [5]. Die Verfahrensvorschrift für das neue Entwurfsverfahren lautet:

1. Berechnung eines gültigen Reglers für das System ohne Totzeit, z.B. LQ-Regler.
2. Überprüfe die Stabilität nach Gleichung (2) für den Regelkreis mit Totzeit. Ist das System instabil, müssen neue Gewichtungsfaktoren gewählt werden und der Verfahrensschritt 1 ist zu wiederholen.
3. Simulation des Totzeitsystems, z.B. mit Hilfe der Feldbustoolbox in Simulink. Entspricht das Ergebnis nicht dem Gewünschten, muss die Entwurfsprozedur mit geänderten Gewichtungsfaktoren wiederholt werden.

Die Leistungsfähigkeit des Entwurfsverfahrens wird anhand eines Simulationsbeispiels demonstriert. Der Regler ist in dem untersuchten Beispiel mit der Sensorik und Aktorik über den Feldbus CAN verbunden.

Literatur

- [1] BOYD, S., L. E. GHAOUI, E. FERON und V. BALAKRISHNAN: *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. SIAM, Philadelphia, 1994.
- [2] HALE, JACK K. und SJOERD M. VERDUYN LUNEL: *Introduction to Functional Differential Equations*. Springer-Verlag New York, 1993.
- [3] HUSMANN, H.: *Ein Beitrag zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens Feldbusgestützter Regelkreise*. VDI-Verlag, Reihe 8, Düsseldorf, 1997.
- [4] MILKE, BURKHARD: *Integration Serieller Feldbussysteme in Hochdynamische Regelkreise*. Shaker-Verlag, München, 1998.
- [5] MOHAMOUD, MAGDI S.: *Robust Control and Filtering for Time-Delay Systems*. Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.

Reale Systeme im virtuellen Labor

C. Röhrig

Lehrgebiet Prozesssteuerung und Regelungstechnik
FernUniversität Hagen
Feithstraße 140, 58097 Hagen
Tel.: +49/2331-987-1102
Fax: +49/2331 987-354
Email: christof.roehrig@fernuni-hagen.de

Schlüsselwörter: Teleoperation, Laborexperimente, Fernlehre

Ziel des vorgestellten Projektes ist es, reale Laborexperimente über das Internet den Studierenden der beteiligten Universitäten zur Verfügung zu stellen. Laborexperimente sind integrale Bestandteile in natur- und ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen. Sie dienen der Umsetzung und Verifizierung der Theorien an realen Systemen sowie dem Erlernen der Handhabung technischer Versuchsanlagen.

Üblicherweise werden an Hochschulen mit großem Aufwand an Geld und Zeit vergleichbare Laborexperimente aufgebaut. Zugleich ist oftmals durch die zunehmende Spezialisierung keine vollständige Abdeckung einzelner Fächer in einem Labor möglich. Hinzu kommt, dass diese Versuche Studierenden nur eingeschränkt und ausschließlich während der eigentlichen Versuchsdurchführung zur Verfügung stehen. An der FernUniversität Hagen, die als einzige Universität im deutschsprachigen Raum ausschließlich über Fernlehre unterrichtet, besteht ferner die Sondersituation, dass etwa 80% der Studierenden berufstätig sind und somit überwiegend in den Abendstunden und am Wochenende das Studienangebot nachfragen. Laborversuche waren bislang in die Fernlehre schwer zu integrieren und für die Studierenden immer mit Reiseaufwand verbunden. Eine Lösung dieses Problems ist die Simulation der Laborexperimente und die Darstellung in virtueller Realität [1]. Die hier vorgestellte Alternative liegt in der Teleoperation von realen Laborexperimenten über das Internet. Durch Teleoperation von Laborexperimenten können die zeitlichen und räumlichen Einschränkungen von lokalen Experimenten überwunden werden.

Am Lehrgebiet für Prozesssteuerung und Regelungstechnik der FernUniversität Hagen wurde ein fernbedienbares regelungstechnisches Labor entwickelt [2]. Das Projekt „Reale Systeme im virtuellen Labor“ wurde in Kooperation mit den Lehrstühlen für Elektrische Steuerung und Regelung der Universitäten Bochum (Prof. Dr.-Ing. Unbehauen, Prof. Dr.-Ing. Schmid) und Dortmund (Prof. Dr. rer. nat. Kiendl) durchgeführt und vom Kompetenznetzwerk Universitätsverbund MultiMedia des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert. Es stehen derzeit drei regelungstechnische Versuche zur hochschulübergreifenden Nutzung zur Verfügung.

Grundlegende Entwurfsidee ist die Nutzung des Internets als Kommunikationsstruktur und die Nutzung eines Web-Browsers als Benutzerinterface. Der Web-Browser stellt ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem sowohl Informationen ausgetauscht werden können als auch Software als Java-Applet ablauffähig ist. Ein Kommunikationsserver, der einen Web-Server und einen Applikationsserver enthält, ist die Schnittstelle zwischen dem Benutzer auf der einen und dem Experiment auf der anderen Seite. Die Software wurde als Client/Server-Architektur entworfen und ist in der Programmiersprache Java™ implementiert. Die Internet-Protokolle dienen zum standardisierten Austausch der Daten zwischen Client und Server.

Um den Zugriff auf die Experimente auf autorisierte Nutzer zu beschränken und um einen ungestörten Experimentablauf zu gewährleisten, wurde eine Zugriffskontrolle mit Terminverwaltung realisiert. Die Nutzer erhalten ein Zeitkontingent für die angemeldeten Versuche, mit welchem sie an freigegebenen Terminen Versuchszeit selbst reservieren

können. Zu den reservierten Zeiten ist ein exklusiver Zugriff auf das Experiment gewährleistet. Das Benutzerinterface der Zugriffsverwaltung wurde als Java-Applet implementiert. Auf der Serverseite wurde dazu ein Java-Applikationsserver entwickelt, der eine SQL-Datenbank nutzt [3].

Zur multimedialen Unterstützung der Versuchsdurchführung wird ein Live-Video und optional ein Live-Audio aus dem Labor zur Verfügung gestellt. Die Studierenden bekommen auf diese Weise ein Gefühl von Telepräsenz. Sie erkennen, dass es sich nicht um eine Simulation handelt. Die Realisierung basiert auf Java Media Framework und ist in [4] beschrieben. Der Versuch, der im Verbund von der FernUniversität Hagen angeboten wird, beinhaltet die Antriebsregelung eines omnidirektionalen Fahrzeuges.

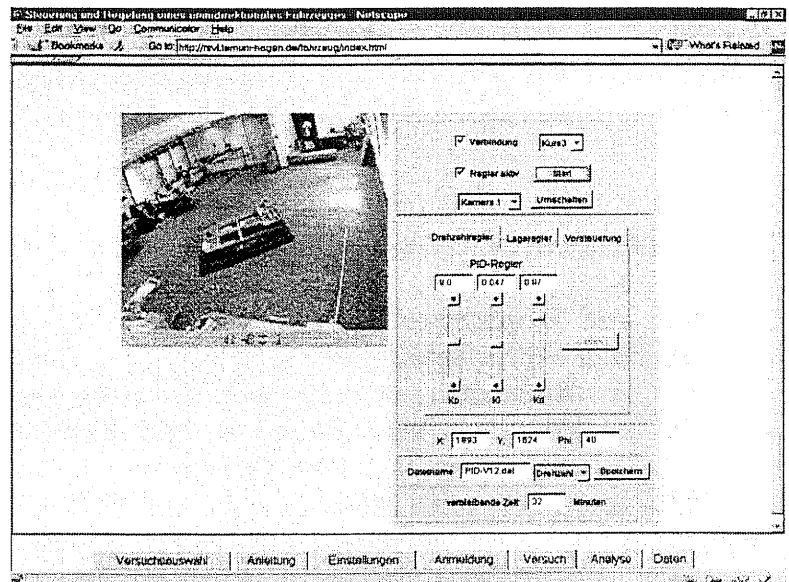


Abbildung 1: Versuchsdurchführung mittels Web-Browser

Die Versuchsdurchführung erfolgt nach erfolgreicher Authentifizierung mit einem Web-Browser (Abbildung 1). Für eine weiterführende Beschreibung des dargestellten Versuchs wird auf [5] verwiesen. Das Experiment der Universität Bochum beinhaltet ein optisches zweiachsiges Nachlaufregelsystem [6]. Von der Universität Dortmund wird das Experiment Fuzzy-Logik basierte Prognose von Störungen am Beispiel eines 3-Tank Systems angeboten. Die Versuche wurden erstmals im Sommersemester 2000 von Studierenden durchgeführt und sind Bestandteil des regulären Studienangebotes der beteiligten Universitäten.

Literatur:

- [1] Schmid, C.: A Remote Laboratory Using Virtual Reality on the Web, Simulation 73 (1), S. 13-21, 1999.
- [2] Reale Systeme im virtuellen Labor: <http://prt.fernuni-hagen.de/rsvl/>.
- [3] Röhrig, C.; Jochheim, A.: Java-based Framework for Remote Access to Laboratory Experiments, In Proc. IFAC/IEEE Symposium on Advances in Control Education, Gold Coast, Australien, 2000.
- [4] Röhrig, C.; Jochheim, A.: The Virtual Lab for Controlling Real Experiments via Internet. In Proc. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, Hawaii, USA, 1999.
- [5] Jochheim, A.; Röhrig, C.: The Virtual Lab for Teleoperated Control of Real Experiments. In Proc. IEEE Conference on Decision and Control, Phoenix, USA, 1999.
- [6] Junge, T.; Schmid, C.: Web-based Remote Experimentation Using a Laboratory-scale Optical Tracker, In Proc. American Control Conference, Chicago, USA, 2000.

DYNAMIT – Erlernen von Systemeigenschaften mit Multimedia-Mitteln

Dipl.-Ing. S. Pegel, Dipl.-Ing. T. Löhl, Prof. Dr.-Ing. C. Schmid, Dipl.-Ing. A. Ali**
Dr.-Ing. S. Engell *

* Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik
Universität Dortmund
44221 Dortmund
Tel.: +49/231/7555127
Fax: +49/231/7555129
Email: ast@ast.chemietechnik.uni-dortmund.de

** Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung
Ruhr-Universität Bochum
44780 Bochum
Tel.: +49/234/3224093
Fax: +49/234/3204093
Email: cs@esr.ruhr-uni-bochum

Schlüsselwörter: Rechnerbasiertes Lernen, Systemanalyse, Internet.

Eine rechnerunterstützte Lehr- und Lernumgebung hat zum Ziel, unabhängig von räumlichen und zeitlichen Beschränkungen den Lernenden in die Lage zu versetzen, den curriculären Lehrinhalten zu folgen. In den Saalübungen werden häufig rechnergestützte Werkzeuge eingesetzt, welche die entsprechenden funktionellen Berechnungen und Simulationen durchführen und somit die Bearbeitung umfangreicher und komplexer Beispiele vereinfachen. Ein Nachteil der Benutzung dieser Werkzeuge ist jedoch, dass häufig zuerst die ‚Sprache‘ des Rechnerwerkzeuges erlernt werden muss. In DYNAMIT wird dieses Problem durch die Integration der Funktionalität von Computer-Aided-Control-System-Design (CACSD) in die Oberfläche eines Web-Browser gelöst, so dass vom Lernenden nur das Wissen über den Umgang mit dem Browser und über mathematische Grundlagen abverlangt wird. Durch diese Konzeption ist das Erlernen der Sprache der entsprechenden mathematischen Werkzeuge nicht notwendig und die dadurch eingesparte Einarbeitungszeit kann sinnvoller genutzt werden.

Neben Netscape als Benutzeroberfläche werden Java/JavaScript für die dynamische Gestaltung der HTML-Dokumente und die quasi Standards MATLAB/SIMULINK und MAPLE für numerische bzw. symbolische Berechnungen verwendet. Simulationen werden durch PlugIns an den Netscape Web-Browser angebunden und können dort auch visualisiert werden. Durch die Kombination von CACSD-Programmen als Berechnungswerkzeuge und der Benutzeroberfläche des Netscape Web-Browsers kann DYNAMIT sowohl von Zuhause, als auch an den Rechnerarbeitsplätzen, die den Studierenden an der Hochschule zur Verfügung stehen, genutzt werden.

Aus der Sicht der didaktischen Konzeption gliedert sich DYNAMIT in einen *Repetitoriumsteil*, einen *Übungsteil* und das *Virtuelle Labor*. Das Repetitorium dient zur Veranschaulichung und zum explorativen Erlernen des entsprechenden Stoffes. Im *Übungsteil* wird das erlernte Wissen auf Aufgaben aus den unterschiedlichen Teilgebieten angewendet. Das *Virtuelle Labor* vertieft das erlernte Wissen zur Regelung von komplexeren Laboranlagen, wobei Methoden der virtuellen Realität zur Realisierung der Anlagen eingesetzt werden.

Ein wesentlicher Vorteil von DYNAMIT ist, dass notwendige Berechnungen durch mathematische Werkzeuge auf der Clientseite durchgeführt werden. Ein Werkzeugkasten erlaubt eine einheitliche symbolische und numerische Berechnung der 'Standardoperationen' der mathematischen Systemanalyse. Die Basis für diese Operationen ist eine Repräsentation eines mathematischen Modells, dass durch einfache Textdateien definiert wird. In Abbildung 1 sind die wichtigsten Elemente der Erweiterungen und der Datenaustausch zwischen diesen und der Umgebung, der neben der Internet-Kommunikation im wesentlichen aus dem Informationsaustausch zwischen dem Web-Browser und dem mathematischen Werkzeug MATLAB be-

steht, dargestellt.

Um MATLAB-Funktionalität in die HTML-Seiten zu integrieren, mussten Plugins einschließlich der zugehörigen Java-Methoden zur Erweiterungen des Browsers entwickelt werden. Zur Erzeugung der Animationssignale durch dynamische Simulation und zur Interaktion mit den Laboranlagen wird die SIMULINK-Erweiterung von MATLAB eingesetzt. Dies schließt Bedienelemente zur Einwirkung auf die simulierte Anlage ein. Für die Realisierung dynamischer Anzeigen von Zeitsignalen während der Simulation oder auch von mathematischen Formelausdrücken und numerischen Zahlenwerten wurden weitere Applets entwickelt. Mit *HotEqn* z.B. werden sowohl statische als auch dynamisch mit MATLAB verknüpfte mathematische und numerische Anzeigen realisiert. Mit *HotScope* ist es möglich, während laufender Simulation Zeitsignale in einem Fenster der HTML-Seite dynamisch anzuzeigen.

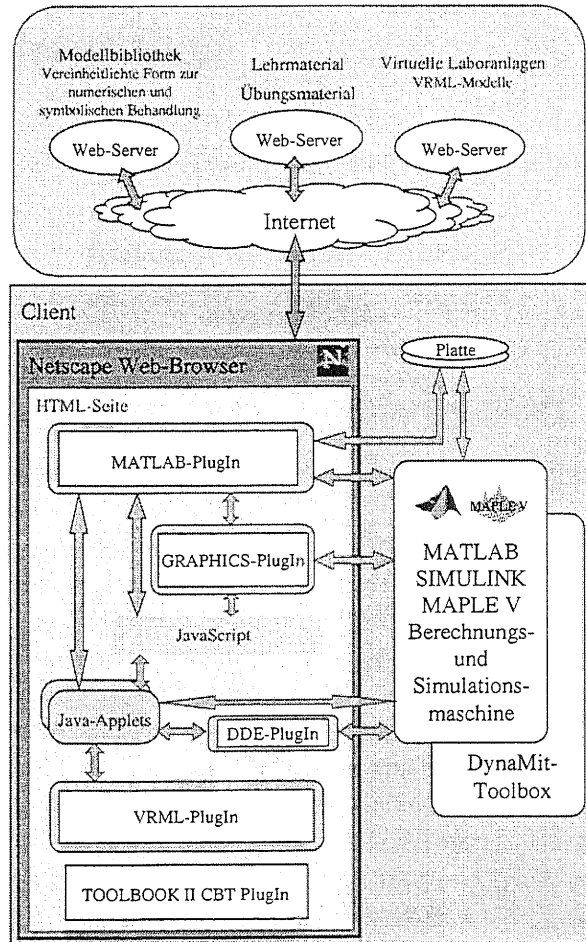


Abbildung 1: Kommunikationsstruktur in DYNAMIT

Aus den bisher erhaltenen Rückmeldungen von Studierenden kann geschlossen werden, dass die Entwicklung von einer ergänzenden, multimedialen Lernumgebung, die über das Internet jederzeit und an jedem internetfähigen Ort aufgerufen werden kann, positiv beurteilt wird [1]. Die interaktive Lernumgebung steigert die Motivation und eröffnet den Studierenden eine Möglichkeit, Probleme individuell und ausführlich zu beantworten.

Ein wichtiges Ziel bei der Entwicklung von DYNAMIT war, die Vorteile der multimedialen Präsentationsmöglichkeiten zu integrieren und auszunutzen. Diese wurde in fast allen Lerneinheiten durch eingebundene Interaktionsmöglichkeiten realisiert. Ein besonderer Vorteil von DYNAMIT ist, das sowohl numerische als auch symbolische Berechnungen dynamisch konfiguriert und Lösungen direkt verglichen werden können. Im Gegensatz zu den meisten bekannten Lernumgebungen wurde dadurch die Möglichkeit eröffnet, Lernerfolgskontrollen, die weit über die üblichen Multiple-Choice-Abfragen hinaus gehen, zu realisieren. Gerade für einen abstrakten und mathematisch ausgerichteten Lehrinhalt ist dieses von großem Vorteil. In der zukünftigen Arbeit soll DYNAMIT erweitert und die bereits bestehenden Lerneinheiten weiter verbessert werden. Unsere Erfahrungen mit dieser Art der Wissensvermittlung sind positiv, und dies obwohl die Entwicklung von DYNAMIT erheblich zeitaufwendiger war, als zu Projektbeginn veranschlagt wurde.

Literatur:

- [1] DYNAMIT Homepage: <http://astwww.chemietechnik.uni-dortmund.de/~mume> oder <http://www.esr.ruhr-uni-bochum.de/uvm> (Febr. 2000).

Strukturvariable Regelungssysteme, basierend auf mehrdeutigen Ljapunov-Funktionen

F. Niewels *

H. Kiendl **

* Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung
Universität Dortmund
Otto-Hahn-Straße 4, 44227 Dortmund
Tel.: +49/231/755-3762
Fax: +49/231/755-2752
Email: niewels@esr.e-technik.uni-dortmund.de

** Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung
Universität Dortmund
Otto-Hahn-Straße 4, 44227 Dortmund
Tel.: +49/231/755-2760
Fax: +49/231/755-2752
Email: kiendl@esr.e-technik.uni-dortmund.de

Schlüsselwörter: Strukturvariabler Regler, Stellgrößenbeschränkung, Stabilität, mehrdeutige Ljapunov-Funktion

Es wird das bekannte – nach wie vor aktuelle – Problem des Entwurfs zeitkontinuierlicher Regler $u(x)$ für lineare Regelstrecken

$$\dot{x} = Ax + bu(x), \quad y = C^T x \quad (1)$$

beliebiger Ordnung unter strikter Berücksichtigung einer Stellgrößenbeschränkung $|u(x)| \leq u_{\max}$ behandelt. Aufgrund der weit entwickelten linearen Theorie werden zur Lösung dieses Problems häufig lineare Regler eingesetzt. Sie besitzen jedoch den Nachteil, den verfügbaren Stellgrößenbereich, insbesondere bei kleinen Störauslenkungen, prinzipiell schlecht auszunutzen. Dieser Nachteil lässt sich durch den Einsatz nichtlinearer Regler überwinden. Deren Entwurf und Analyse ist jedoch meist sehr aufwändig. Ein strikter Stabilitätsnachweis ist schwierig oder sogar unmöglich. Zur Kombination der Vorteile linearer und nichtlinearer Regler wird in [1, 2] ein Entwurfskonzept für strukturvariable Regler vorgestellt. Bei der *diskreten* Version dieses Konzepts wählt man eine Menge $K = \{k(V) \mid V = 1, \dots, N\}$, bestehend aus N linearen Teilreglern $u = -k^T(V)x$, die folgende drei Eigenschaften besitzen:

- (i) Für Werte $V_1 < V_2$ ist der Teilregler $k(V_1)$ stärker als $k(V_2)$ und führt so zu einer höheren Regelgüte.
- (ii) Zu jedem Teilregler $k(V)$ wird ein Gebiet $G(V)$ so entworfen, dass jede Trajektorie, die in $G(V)$ startet, asymptotisch gegen die Ruhelage $x_R = 0$ strebt, ohne $G(V)$ zu verlassen oder die Stellgrößenbeschränkung zu verletzen.
- (iii) $G(V_1)$ liegt für Werte $V_1 < V_2$ vollständig innerhalb des Gebietes $G(V_2)$ (*Schachtelungsbedingung*).

Hiermit liegt jeder Vektor $x \in G(N)$ innerhalb genau eines Gebietes $S(V) = G(V) \setminus G(V-1)$ mit $V = 1, \dots, N$ und $S(1) = G(1)$. Daher ordnet die Bedingung $x \in S(V)$ jedem $x \in G(N)$ genau einen Wert $V = V(x)$ zu (*Auswahlstrategie*). Die strukturvariable Regelung besteht nun darin, für jeden Systemzustand $x \in G(N)$ die Stellgröße nach

$$u(x) = -k^T(V(x))x \quad (2)$$

zu bestimmen, d. h. den jeweiligen linearen Teilregler zu aktivieren. Dieses Regelungskonzept sichert unter strikter Einhaltung der Stellgrößenbeschränkung sowohl Stabilität, als auch eine höhere Regelgüte, als es ein einzelner linearer Teilregler könnte.

Die *kontinuierliche* Version dieses Entwurfskonzepts verwendet eine kontinuierliche Menge $K = \{k(V) \mid V_{\min} < V < V_{\max}\}$ linearer Teilregler und kontinuierlich ineinander geschachtelte

Gebiete $G(V)$ mit den Eigenschaften (i) – (iii) [1, 2]. Hierbei wird $V(x)$ implizit durch die Auswahlstrategie $\underline{x} \in \partial G(V)$ definiert und die Stellgröße wiederum nach (2) ermittelt.

Ein hierauf aufbauendes Entwurfsverfahren, das spezielle Mengen K von Teilreglern und spezielle Gebiete $G(V)$ verwendet, wird in [3] vorgestellt. Die Auswahlstrategie wird in Form einer Gleichung $g(V, \underline{x}) = 0$ umgeschrieben. Die entsprechende Umformulierung der Eigenschaften (iii) bzw. (ii) auf diese Schreibweise liefert die Forderungen:

$$g_V := \frac{\partial g(V, \underline{x})}{\partial V} < 0, \quad g_t := \frac{\partial g(V, \underline{x}(t))}{\partial t} < 0. \quad (3), (4)$$

Aus dem Haupttheorem über implizite Funktionen folgt $\dot{V}(x) = -g_t/g_V < 0$. Somit kann $V(x)$ sowohl als stabilitätssichernde Ljapunov-Funktion als auch als Auswahlparameter für die strukturvariable Regelung genutzt werden.

Um eine hohe Regelgüte zu gewährleisten, sollten stärkere Teilregler (Regler mit kleineren Werten V , vgl. (i)) so früh wie möglich aktiviert werden. Hierzu sollte jedes Gebiet $G(V)$ unter Berücksichtigung der Stellgrößenbeschränkung so groß wie möglich ausgelegt werden. Dies führt jedoch häufig dazu, dass die Gebiete nicht mehr ineinander geschachtelt sind (iii) und damit zu einer Verletzung von Forderung (3). In [4, 5] wird das Konzept mehrdeutiger Ljapunov-Funktionen eingeführt. Hiermit ist es möglich, auch ohne Einhaltung einer Schachtelungsbedingung (iii) bzw. (3) asymptotische Stabilität gewährleisten zu können. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie dieses Konzept innerhalb des beschriebenen Entwurfsverfahrens für strukturvariable Regler eingesetzt werden kann. Dadurch wird die Effizienz des Entwurfsverfahrens gesteigert und ein zusätzlicher Freiheitsgrad hinzugefügt. Für die resultierenden strukturvariablen Regelungen bedeutet dies eine Erhöhung der Regelgüte sowie eine Vergrößerung ihres Anwendungsgebietes $G(V_{\max})$. Diese für die Praxis relevanten Vorteile werden anhand eines Anwendungsbeispiels belegt. Erstmals ist damit ein Anwendungsgebiet für das Konzept mehrdeutiger Ljapunov-Funktionen erschlossen worden [6].

Literatur:

- [1] Kiendl, H., Schneider, G.: Synthese nichtlinearer Regler für die Regelstrecke const/s^2 aufgrund ineinandergeschachtelter abgeschlossener Gebiete beschränkter Stellgröße. Regelungstechnik und Prozeß-Datenverarbeitung, 20(7), 289-296, 1972.
- [2] Kiendl, H.: Suboptimale Regler mit abschnittsweise linearer Struktur. Springer, Berlin, 1972.
- [3] Adamy, J.: Strukturvariable Regelungen mittels impliziter Ljapunov-Funktionen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991. Erschienen in: VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 271.
- [4] Kiendl, H.: Fuzzy Control methodenorientiert. Oldenbourg, München, Wien, 1997.
- [5] Niewels, F., Kiendl, H.: Ein Stabilitätssatz auf der Basis mehrdeutiger Ljapunov-Funktionen. Forschungsbericht 0599 der Fakultät für Elektrotechnik der Universität Dortmund. ISSN 0941-4169, 1999.
- [6] Niewels, F., Kiendl, H.: Use of Many-Valued Lyapunov-Functions for Synthesizing Structure-Variable Control Systems. Proc. World Automation Congress 2000, Hawai'i, USA, 11.-16. Juni 2000.

High-Performance Gain-Scheduling Controllers

P. Korba

Prof. P. M. Frank, Fachgebiet Meß- und Regelungstechnik
Universität –GH– Duisburg, D-47048 Duisburg
{p.m.frank,p.korba}@uni-duisburg.de

Kurzfassung

Die ständig wachsenden industriellen Anforderungen an die Leistung der Regelungen unter allen zulässigen Arbeitsbedingungen können mit linearen Reglern nicht immer zufriedenstellend sichergestellt werden. Dies führt in der Forschung zum Untersuchen möglichst einsetzfreundlicher nichtlinearer Regelungskonzepte. In dieser Arbeit wurde solch ein modellbasiertes Verfahren zur Fuzzy-Regelung, das nicht nur die Stabilität sondern auch das vorgeschriebene Verhalten des geschlossenen Regelungskreises garantiert, entwickelt. Hierfür wurde ein konstruktiver Algorithmus zur Herleitung der nötigen Fuzzy-Modelle und zur Berechnung der Fuzzy-Reglerparameter vorgeschlagen [4]. Beim Regler handelt es sich um einen Fuzzy-Gain-Scheduler (FGS). Die Berechnung aller Parameter basiert auf Matrizenungleichungen [2], die mit Hilfe der in den letzten Jahren neu entwickelten konvexen Optimierungstechniken numerisch gelöst werden können [3]. Diese Methode wurde unter anderem auf ein nichtlineares regelungstechnisches Benchmarkproblem [8], auf andere aus Veröffentlichungen in internationalen Zeitschriften übernommene regelungstechnische Probleme [7] und auf Echtzeit Regelungen angewendet [9, 6, 5]. Dabei hat sich die Überlegenheit dieses Entwurfsverfahrens gegenüber anderen Lösungen gezeigt.

Es wird eine Methode für den Entwurf von Gain-Scheduling Reglern vorgestellt, die sich folgendermaßen charakterisieren läßt: (a.) Diese Methode ist *konstruktiv* - kein Trial-and-error-Verfahren, wie es sonst für die Fuzzy-Regelung [12] und Gain-Scheduling [10] typisch war. (b.) Der ganze nichtlineare Reglerentwurf kann mit nur einer geringen Anzahl (typischerweise zwei oder drei) *tuning Parameter* charakterisiert werden, die eine Physikalische Bedeutung haben [5, 8]. (c.) Diese Methode *garantiert* die Stabilität und das vorgeschriebene Verhalten auch im Falle schneller Umschaltungen zwischen Arbeitsbereichen, wenn der nichtlineare Fuzzy-Regler in einem Schritt als ein Ganzes berechnet wird - ohne lokal separate Reglerentwürfe für einzelne Arbeitsbereiche. Die Berechnung aller Reglerparameter erfolgt automatisch aus lokalen linearen Takagi-Sugeno Fuzzy-Modellen mit Hilfe erschwinglicher mathematischer Software [11]. Einige Implementierungsbeschränkungen können in diesem Reglerentwurf direkt mitberücksichtigt werden. Zusammen mit weiteren präsentierten Erweiterungen (z.B. mit dem Fuzzy-Zustandsbeobachter oder erweiterten Fuzzy-Regler) ist diese Methode daher einsatzbereit für praktische Anwendungen [4, 5]. (d.) Im Prinzip sind die mit dieser neuen Methode entworfenen Regler *einfach* [8]. Das vereinfacht z.B. die Realisierung bezüglich der nötigen Hardware usw. [5]. (e.) Da die neue Methode auf quadratischen Lyapunov-Funktionen basiert, ist sie konservativ [1]. Aus diesem Grund wurden einige *Reglerentwurfstrategien* entwickelt und mit sehr guten Ergebnissen sowohl an Simulationsbeispielen als auch an Echtzeit-Versuchen und Anwendungen getestet [4, 6, 9].

Literatur

- [1] P. Apkarian and P. Gahinet. A Convex Characterization of Gain-Scheduled H_∞ Controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(5):853–864, 1995.
- [2] S. Boyd, L.E. Ghaoui, E. Feron, and V. Belakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theorie*, volume 15. SIAM: Studies In Applied Mathematics, Philadelphia, USA, 1994.
- [3] P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, and M. Chilali. *LMI Control Toolbox*. MathWorks, Natick, USA, 1995.
- [4] P. Korba. *A Gain-Scheduling Approach to Model-Based Fuzzy Control*. VDI Verlag, Düsseldorf, Germany, 2000.
- [5] P. Korba, R. Babuška, H.B. Verbruggen, and P.M. Frank. Fuzzy Gain Scheduling: Controller and Observer Design by means of the Lyapunov Method and Convex Optimization Techniques. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, (to appear in).
- [6] P. Korba and P.M. Frank. An applied optimization-based gain-scheduled fuzzy control. In *Proc. of the American Control Conference ACC2000*, pages 3383–3387, Chicago, USA, June 2000 (Best Session Award).
- [7] P. Korba and H. Werner. On Design and Analysis of Gain-Scheduled Control Using Local Controller Networks. *International Journal of Control*, (submitted).
- [8] P. Korba, H. Werner, and P.M. Frank. A LMI-based fuzzy gain-scheduling for the TORA benchmark nonlinear control problem. In J. Maciejovski, editor, *Control 2000*, Cambridge, UK, 4.-7. September 2000.
- [9] T. Meister, H. Werner, P. Korba, H. Unbehauen, and D.M. Herlach. Application of LMI-based Gain-Scheduled Controllers to an Electrostatic Levitator. In *Proc. of the 6-th European Control Conference ECC 2001*, Porto, Portugal, 2001 (submitted).
- [10] J.S. Shamma. Linearization and Gain-Scheduling. In W.S. Levine, editor, *The Control Handbook*, chapter 20.3, pages 388–396. CRC Press, 1996.
- [11] K. Tanaka, T. Ikeda, and H.O. Wang. Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6(2):250–265, 1998.
- [12] K. Tanaka and M. Sugeno. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 45:135–156, 1992.

Verifikation des SIPN-Programms mittels Model Checking Verfahren

M. Sc. Xiyang Weng

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Prof. Dr.-Ing. Lothar Litz
Universität Kaiserslautern
Tel.: +49-631-2054457, Fax: +49-631-2054462
Email: weng@eit.uni-kl.de

Schlüsselwörter: SIPN, Model Checking, Verifikation

Aufgrund der zunehmenden Komplexität moderner Automatisierungssysteme stellen sich auch neue Anforderungen an Steuerungssysteme. Formale Ansätze, wie z.B. Petri-Netze, ermöglichen einerseits eine transparente Darstellung sowie Dokumentation, andererseits bieten sie auch die Möglichkeit mathematischer Analyse und Verifikation, womit die Zuverlässigkeit der Systeme erhöht wird. Neben konventionellen Methoden wie Test und Simulation werden formale Verifikationsmethoden immer interessanter, mit denen man die Korrektheit eines Steuerungsprogramms sicherstellen und Fehler früher erkennen kann.

SIPN: Ein Signal Interpretiertes Petri-Netz ist auf binäre Steuerungssysteme zugeschnitten. Es basiert auf einem gewöhnlichen Stellen/Transitionen-Netz, das um Informationsflüsse erweitert wird. Damit läßt sich mit dem Netz das Eingabe-Ausgabe-Verhalten einer Steuerung darstellen. Die Stellen werden als Erzeuger von Ausgangssignalen aufgefasst, die auf den technischen Prozess einwirken. Das Schalten von Transitionen wird außer von ihrer Schaltbarkeit noch von zusätzlichen Prozessbedingungen abhängig gemacht.

Die Methoden zur Überprüfung der Korrektheit eines Entwurfs in SIPN basieren bislang auf der Analyse des expliziten Erreichbarkeitsgraphen. Hierzu muss das gewünschte Prozessverhalten mit interpretierten Petri-Netzen modelliert werden, was häufig sehr schwierig ist und eine neue Fehlerquelle darstellt. Besonders bei sicherheitsrelevanten Systemen, bei denen das korrekte Verhalten des Steuerungssystems für alle möglichen Belegungen der Eingangssignale zu gewährleisten ist, stoßen diese Modell-basierten Verfahren an ihre Grenzen. Eine vielversprechende Alternative stellt das in der Informatik etablierte Symbolic Model Checking dar. Die Anwendung in der Automatisierungstechnik steckt jedoch zur Zeit noch in den Kinderschuhen.

Symbolic Model Checking: Unter Model Checking versteht man einen Computer unterstützten mathematischen Beweisvorgang dafür, dass ein Entwurf die formalen Anforderungsspezifikationen erfüllt. Beim Symbolic Model Checking werden symbolische Darstellungen und Behandlungsverfahren eingesetzt, um große Systeme untersuchen zu können. Dieses Verfahren umfasst drei Aspekte:

Modell: Das System ist eine Kripke Struktur, die aus einer Menge von Stellen, Transitionen zwischen den Stellen, sowie „atomic propositions“ an den Stellen besteht, welche deren Eigenschaften beschreiben.

Spezifikationen: Sie stellen die Anforderungen dar, die das System erfüllen muss. Mittels temporaler Logik lässt sich das Systemverhalten hinsichtlich des Zeitverhaltens beschreiben.

Verifikation: Etablierte Model Checking Algorithmen sind verfügbar. Zur Anwendung ist ein geeignetes Tool zu finden, welches den jeweiligen Formalismus unterstützt.

Mit dem SIPN Ansatz lässt sich das sequenzielle Verhalten von Steuerungssystemen widerspiegeln, das eigentlich eine Reihe von „transition relations“ darstellt. Dieses erkennt man an dem Erreichbarkeitsgraphen, welcher einen Moore-Automaten darstellt. Die Ausgangssignale an den jeweiligen Zuständen im Erreichbarkeitsgraphen können direkt als die „atomic propositions“ betrachtet werden, und die Eingangssignale sind die Transitionsbedingungen. Mittels geeigneter Codierungsmethoden lassen sich die gesamten Transitionen durch eine Boolesche Funktion darstellen. Dabei ist es wichtig, dass durch die Codierung mit der Programmiersprache des Tools das SIPN strukturell unverändert dargestellt wird, damit die Semantik des Modells dem Originalnetz entspricht.

Die zu untersuchenden Eigenschaften eines SIPN können in zwei Gruppen unterteilt werden, nämlich die Korrektheit des Formalismus und die Korrektheit der zu realisierenden Funktionen. Die wichtigsten Eigenschaften des Formalismus sind z.B.:

- **Verklemmungsfreiheit:** Das System soll nie in einen Zustand geraten, in dem kein weiterer Zustand erreicht werden kann (totale Verklemmung) oder in dem nur bestimmte Zustände wieder erreicht werden können (partielle Verklemmung).
- **widerspruchsfreie Ausgangssignale:** Bei jedem Zustand des Systems sollen alle Ausgangssignale widerspruchsfrei definiert werden. Gleichzeitig markierte Stellen mit zueinander widersprüchlichen Ausgaben würden widersprüchliche Reaktionen im zu steuernden Prozess auslösen, was zu Fehlverhalten, evtl. sogar zu Zerstörungen führen kann.
- **Reversibilität:** Der Anfangszustand soll von jedem erreichbaren Zustand aus wieder erreicht werden können, da ein Controller zyklisch arbeitet.

Die zu realisierenden Funktionen variieren von Aufgabenstellung zu Aufgabenstellung. Deswegen lassen sich die Anforderungen nicht in allgemeine Kriterien zusammenfassen. Typische Anforderungen sind:

- die Sicherheitsanforderung, dass ein gefährlicher Zustand nie erreicht werden soll,
- invariante Eigenschaften, d.h. die zu untersuchenden Eigenschaften sollen bei jedem erreichbaren Zustand gelten und
- Erfüllbarkeitseigenschaften, d.h. bestimmte Eigenschaften werden in nächsten Zuständen oder irgendwann in der Zukunft erfüllt, usw.

Mittels dieses Verfahrens wird die Erfüllung der Eigenschaften bei allen Kombinationen von Eingangssignalen berücksichtigt, d.h. die physikalisch unmöglichen Eingangsbelegungen, die auf Sensorfehler hinweisen können, werden auch mit einbezogen. Im Vortrag wird die Theorie auch anhand eines Beispiels illustriert.

Literatur:

- [1] Clarke, E., Grumberg, O. and Peled, D.A. *Model Checking*. (1999). The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England. ISBN 0-262-03270-8.
- [2] Weng, X. and Litz, L.: Verification of logic control design using SIPN and model checking – Methods and case study. In Proceeding of American Control Conference, ACC'2000. June 28.–30. 2000, Chicago, USA.

Fehlerdiagnose mit qualitativen Modellen

J. Schröder *

* Arbeitsbereich Regelungstechnik
Technische Universität Hamburg-Harburg
Eißendorfer Str. 40, 21073 Hamburg
Tel.: +49/40/42878 3407
Fax: +49/40/42878 2112
Email: j.schroeder@tu-harburg.de

J. Lunze **

** Arbeitsbereich Regelungstechnik
Technische Universität Hamburg-Harburg
Eißendorfer Str. 40, 21073 Hamburg
Tel.: +49/40/42878 3015
Fax: +49/40/42878 2112
Email: lunze@tu-harburg.de

Schlüsselwörter: Qualitative Modellierung, qualitative Diagnose, quantisierte Systeme, stochastische Automaten

Viele Diagnoseaufgaben können durch eine qualitative Betrachtung des Systemverhaltens gelöst werden. Wenn die betrachteten Fehler das Systemverhalten qualitativ ändern, kann die Diagnoseaufgabe dadurch vereinfacht werden, dass man nur noch die qualitativen Werte der messbaren Ein- und Ausgangsgrößen zur Diagnose verwendet. Das Prinzip der qualitativen Diagnose ist in Abbildung 1 gezeigt. Die beiden Quantisierer liefern die qualitativen Werte $[u]$ und $[y]$ der wertekontinuierlichen Ein- und Ausgangsgrößen u und y .

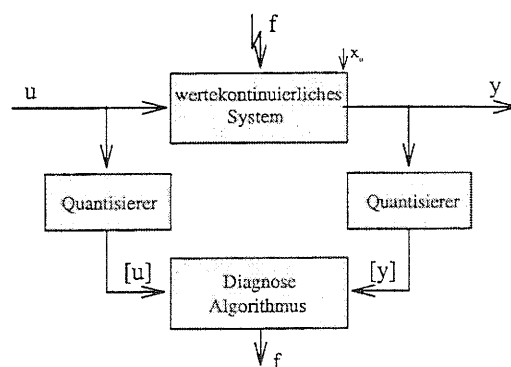


Abbildung 1: Qualitative Fehlerdiagnose.

Grundlage der qualitativen Fehlerdiagnose bildet ein qualitatives dynamisches Modell des Systems. Aus Sicht des Diagnose-Algorithmus verhält sich das wertekontinuierliche System wie das in Abbildung 2 oben gezeigte quantisierte System [4].

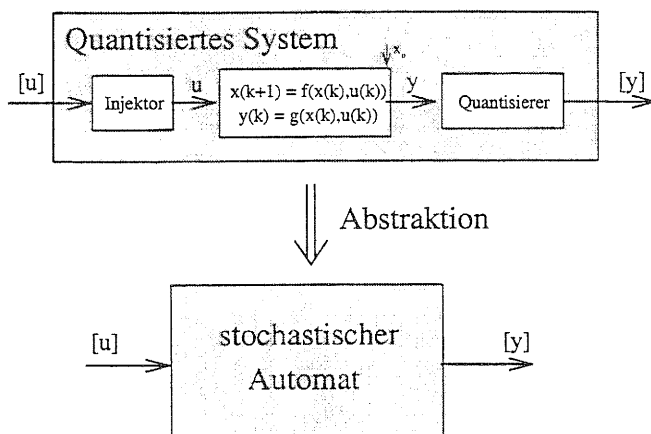


Abbildung 2: Quantisiertes System und Abstraktion zum stochastischen Automaten.

Das quantisierte System ist ein hybrides System, da es symbolische Ein- und Ausgangssignale $[u]$ und $[y]$ besitzt, denen eine kontinuierliche Systemdynamik unterlagert ist [3]. Für die Lösung der Diagnoseaufgabe ist es zweckmäßig, das quantisierte System durch ein einfacheres Modell darzustellen. Als besonders zweckmäßig haben sich hierfür stochastische Automaten erwiesen [2], die im Vortrag mit Hinblick auf die qualitative Modellierung zur Fehlerdiagnose vorgestellt werden. Der stochastische Automat kann durch Abstraktion mittels Zellabbildungsalgorithmen aus dem quantisierten System berechnet werden [5]. Es ist auch möglich, das qualitative Modell direkt aus Messwertfolgen zu identifizieren [1].

Nachdem das qualitative Modell verfügbar ist, können Verfahren aus der ereignisdiskreten Systemtheorie zur Fehlerdiagnose eingesetzt werden [6]. Der Vortrag stellt ein Diagnoseverfahren für stochastische Automaten vor und zeigt, wie die Ergebnisse auf das

quantisierte System übertragen werden können [7]. Das Verfahren liefert Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der betrachteten Fehler. Das Diagnoseverfahren bestimmt zu jedem Zeitpunkt T die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die bis zur Zeit T gemessenen qualitativen Ein- und Ausgangssymbole in dem qualitativen Modell unter Berücksichtigung der betrachteten Fehlerfälle enthalten sind. In Abbildung 3 sind die Wahrscheinlichkeiten in Graustufen dargestellt, wobei die Felder mit zunehmender Wahrscheinlichkeit dunkler werden. Man erkennt aus der Abbildung, dass zur Zeit $T=0$ alle betrachteten Fehler als möglich erachtet werden und dass mit zunehmender Zeit und folglich mit zunehmender Zahl von Messungen die Fehler wahrscheinlicher bzw. unwahrscheinlicher werden. Es ist ferner zu sehen, dass in dem Beispiel der Fehler nach 250 Sekunden eindeutig identifiziert ist, ein Fehlverhalten des Systems jedoch schon nach 200 Sekunden detektiert wurde.

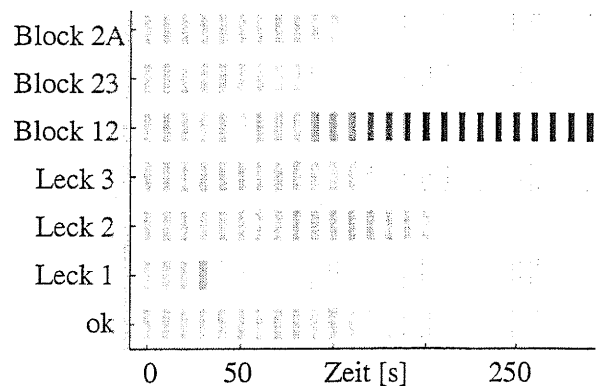


Abbildung 3: Diagnoseergebnis.

Als Anwendungsbeispiel zeigt der Vortrag Diagnoseergebnisse für das Antriebssystem eines Fährschiffes. Als Ausblick wird in dem Beitrag dargestellt, wie sich die Diagnoseaufgabe für das komplexe Schiffsantriebssystem durch Komposition mit Hilfe von Automatenetzen lösen läßt.

Literatur:

- [1] Lichtenberg, G.; Lunze, J.; Scheuring, R.; Schröder, J.: Prozessdiagnose mittels qualitativer Modelle am Beispiel eines Wasserstoffverdichters, *Automatisierungstechnik*, 47 (1999), 101-109.
- [2] Lunze, J.: Qualitative Modellierung dynamischer Systeme durch stochastische Automaten, *Automatisierungstechnik*, 46 (1998), 271-283.
- [3] Lunze, J.; Nixdorf, B.; Schröder, J.: Deterministic Discrete-Event Representations of Linear Continuous-Variable Systems, *Automatica*, 35 (1999), 395-406.
- [4] Lunze, J.; Schröder, J.: Process Diagnosis Based on a Discrete-Event Description, *Automatisierungstechnik*, 47 (1999), 358-365.
- [5] Lunze, J.; Schröder, J.: Sound Abstraction of Quantised Systems, eingereicht zur European Control Conference, (2001), Porto, Portugal.
- [6] Lunze, J.; Schröder, J.: State Observation and Diagnosis of Discrete-Event Systems Described by Stochastic Automata, erscheint in *Discrete-Event Dynamic Systems*, 2001.
- [7] Schiller, F.; Schröder, J.: Combining Qualitative Model-Based Diagnosis and Observation within Fault-Tolerant Systems, *AI Communications*, 12 (1999), 79-98.

Identifikation nichtlinearer Prozesse mit lokal linearen Modellen

S. Töpfer *

* Institut für Automatisierungstechnik
Fachgebiet für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung
Technische Universität Darmstadt
Landgraf-Georg-Straße 4 , 64283 Darmstadt
Tel.: +49/6151/16-4524
Fax: +49/6151/293445
Email: SToepfer@iat.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: Experimentelle Modellbildung, Lokal lineare Modelle, Strukturoptimierungsverfahren, Hierarchische Modellstruktur

Die experimentelle Modellbildung oder Identifikation hat die Aufgabe, basierend auf Messdaten, mathematische Modelle von Prozessen zu erstellen. Diese Modelle sind für zahlreiche Anwendungen der Automatisierungstechnik erforderlich wie z.B. die Regelung, Steuerung oder Fehlerüberwachung komplexer Prozesse. Dem Einsatz klassischer, linearer Identifikationsverfahren sind aufgrund des nichtlinearen Verhaltens realer Prozesse über weite Arbeitsbereiche hinweg enge Grenzen gesetzt. In den letzten Jahren haben sich deshalb verstärkt Forschungsaktivitäten auf die Bereiche der künstlichen, neuronalen Netze und der Fuzzy-Logik konzentriert. Generelle Probleme bei der Generierung derartiger Black-Box Modelle sind jedoch die fehlende Transparenz sowie die Einstellung einer geeigneten Modellkomplexität zur Vermeidung von Über- oder Unteranpassung. Das letztere Problem wird als Bias-Varianz Dilemma bezeichnet.

Eine vielversprechende Modellarchitektur, die im Umfeld der künstlichen Intelligenz entwickelt worden ist, stellen die lokalen Modelle dar [1]. Sie beruhen auf der Aufteilung des betrachteten Eingangsraumes in Teilgebiete, innerhalb derer nur noch einfache, zumeist lineare Teilmodelle gültig sind. Unter Ausnutzung der Lokalität gestatten diese Modellansätze den effektiven Einsatz von Strukturoptimierungsverfahren, die die Modellkomplexität durch schrittweise Erhöhung oder Verringerung an die Komplexität des Prozesses anpassen.

Besonders effizient sind hierbei hierarchische Konstruktionsalgorithmen, die ausgehend von einer einfachen Modellannahme lokal die Flexibilität des Modells adaptieren. Gegenüber konventionellen, neuronalen Netzarchitekturen, z.B. den mehrschichtigen Perzeptronen-Netzen, weisen diese hierarchisch konstruierten lokalen Modelle wesentlich verbesserte Eigenschaften bezüglich Trainingsgeschwindigkeit, Interpretierbarkeit und möglichst geringer Modellkomplexität auf. Die Kombination lokaler Modellansätze mit externen

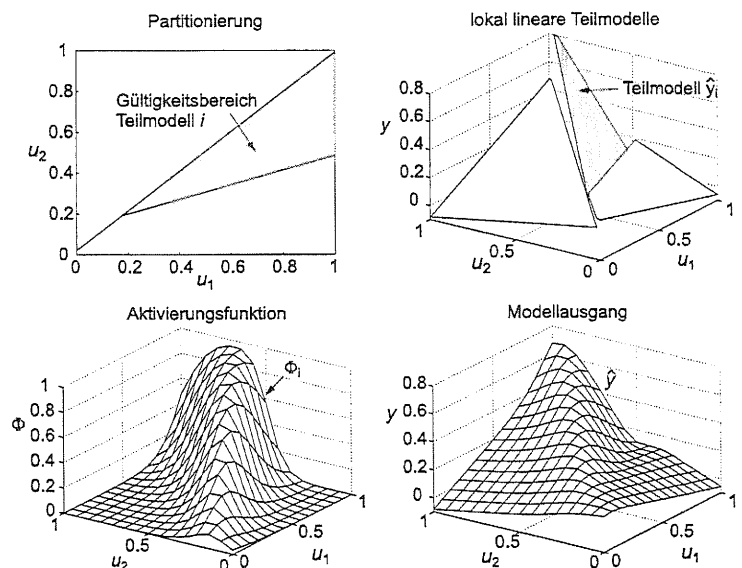


Abbildung 1: Hinging Hyperplane Baummodelle

Dynamikelementen, die Vergangenheitswerte der Ein- und Ausgangssignale am Modelleingang bereitstellen, ermöglicht die Identifikation dynamischen Prozessverhaltens [2]. Die einzelnen linearen Teilmodelle besitzen dann exakt die Struktur linearer Ein-/Ausgangsmodelle. Aufgrund dieser Eigenschaft können sie als Übertragungsfunktionen unter Angabe der dynamischen Ordnung, der statischen Verstärkung, der Pole und Nullstellen sowie von Totzeiten interpretiert werden [3].

In diesem Beitrag wird eine lokale Modellarchitektur vorgestellt, die am Institut für Automatisierungstechnik entwickelt worden ist [4]. Die Hinging Hyperplane Baummodelle stellen lokal lineare Modelle dar, die sich gegenüber anderen Architekturen durch eine achsen-schräge, rekursive Partitionierung des Eingangsraumes auszeichnen. Die Gültigkeitsbereiche der einzelnen lokalen Teilmodelle sind durch sich überlappende Aktivierungsfunktionen bestimmt, die einen gewichteten Übergang an den Teilmodellgrenzen bewirken. Abbildung 1 zeigt die einzelnen Bestandteile eines solchen Modells. Die flexible Unterteilung von Hinging Hyperplane Baummodellen erweitert die Anwendungsmöglichkeiten des lokalen Modellansatzes auch auf stark nichtlineare Prozesscharakteristiken sowie hochdimensionale Eingangs-räume. Sie stellt somit eine entscheidende Voraussetzung zur Überwindung des "Fluch der Dimensionalität" dar. Andererseits gestattet die resultierende Interpretierbarkeit der Modelle das Einbringen verschiedener Formen von Vorwissen über die Charakteristik des zu identifizierenden Prozesses. Dieser Beitrag beschreibt den hierarchischen Algorithmus zur Konstruktion der Modelle. Auf einige erweiterte Aspekte z.B. die lokale Parameterschätzung sowie Möglichkeiten der Repräsentation von Vorwissen wird kurz eingegangen. Die Approximationseigenschaften werden am Beispiel der nichtlinearen Prozesscharakteristik von Verbrennungsmotoren verdeutlicht.

Literatur:

- [1] Murray-Smith, R.; Johanson, T. A.: Multiple Model Approaches to Modelling and Control, Taylor & Francis, London, 1997.
- [2] Isermann, R.; Ernst (Töpfer), S.; Nelles, O.: Identification with Dynamic Neural Networks – Architectures, Comparisons, Applications, in: Proceedings of IFAC Symposium on System Identification (SYSID), Fukuoka, Japan, 1997
- [3] Nelles, O.: Nonlinear System Identification with Local Linear Neuro-Fuzzy Models. Shaker Verlag, Darmstadt, 1999
- [4] Ernst (Töpfer), S.: Hinging Hyperplane Trees for Approximation and Identification, in: Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control (CDC) 1998, Tampa, USA.

Robuster Entwurf von Kompensatoren für komplexe hysteresese- und kriechbehaftete Nichtlinearitäten am Beispiel von piezoelektrischen Aktoren

Klaus Kuhnen, Hartmut Janocha

Lehrstuhl für Prozeßautomatisierung (LPA)
Universität des Saarlandes
Im Stadtwald Geb. 13, 66041 Saarbrücken
Telefon: 0049-(0)681/302-4715
Telefax: 0049-(0)681/302-2678
E-Mail: klaus@lpa.uni-sb.de

Schlüsselwörter: Hysteresis, Kriechen, Kompensation, piezoelektrische Aktoren

Unerwünschte komplexe hysteresesebehaftete Nichtlinearitäten treten in unterschiedlich starker Ausprägung in nahezu allen, auf multifunktionalen Werkstoffen basierenden Sensoren und Aktoren auf, sofern diese mit genügend hohen Amplituden angesteuert werden. Beispiele für solche Nichtlinearitäten sind Aktoren und Sensoren aus piezoelektrischen und magnetostriktiven Materialien sowie aus Formgedächtnislegierungen. Einerseits können diese Nichtlinearitäten in vielen Anwendungen durch die Auswahl geeigneter Werkstoffe und Aussteuerungsbereiche klein gehalten werden, so daß lineare Sensor- und Aktormodelle das reale Betriebsverhalten hinreichend genau wiedergeben. Andererseits muß eine große Zahl von Systemen aufgrund steigender Anforderungen an ihre Leistungsfähigkeit in Steuerbereichen betrieben werden, in denen der Einfluß von hysteresesebehafteten Nichtlinearitäten unvermeidlich ist. Dieser Umstand erfordert die Entwicklung von rein phänomenologischen Modellen, die die auftretenden hysteresesebehafteten Nichtlinearitäten hinreichend präzise nachbilden können und für den Entwurf von echtzeitfähigen Steuerungsstrategien zur Kompensation dieser Nichtlinearitäten geeignet sind.

Rein phänomenologisch Modelle zur Beschreibung hysteresesebehafteten Übertragungsverhaltens haben sich aus zwei unterschiedlichen Zweigen der Physik entwickelt: dem Ferromagnetismus und der Plastizitätstheorie. Die Wurzeln beider Zweige liegen am Ende des 19-ten Jahrhunderts. Jedoch erst Ende der 60er bzw. zu Beginn der 70er Jahre des 20-ten Jahrhunderts wurde ein mathematischer Formalismus zur systematischen Behandlung hysteresesebehafteter Übertragungsglieder entwickelt. Den Kern dieser Theorie bilden sogenannte Hystereseseoperatoren, die hysteresesebehaftete Übertragungsglieder als Abbildung zwischen Funktionenräumen beschreiben [2,3]. Aus diesem Ansatz heraus hat sich ein eigenständiger Zweig innerhalb der Systemtheorie entwickelt, mit dem sich komplexes, hysteresesebehaftetes Übertragungsverhalten losgelöst von den physikalischen Hintergründen rein phänomenologisch behandeln läßt. Während anfangs überwiegend der Preisach-Hystereseseoperator als Grundlage für die Modellbildung und inverse Steuerung von Festkörperaktoren herangezogen wurde [1,5], verwenden neuere Arbeiten auch den Prandtl-Ishlinskii-Hystereseseoperator, der eine wichtige Unterklasse der Preisach-Hystereseseoperatoren bildet [4]. Allerdings zeigen gerade piezoelektrische Aktoren, die wegen ihrer speziellen Eigenschaften immer häufiger als innovative Antriebe eingesetzt werden, im Bereich großer Ansteueramplituden neben hysteresesebehafteten Nichtlinearitäten auch starke dynamische Kriecheffekte. Da aber Hystereseseoperatoren ihrer Natur nach statische Übertragungsglieder sind, erfordert eine gleichzeitige Berücksichtigung von hysteresesebehafteten Nichtlinearitäten

und dynamischen Kriecheffekten eine Erweiterung des operatorbasierten Konzeptes um Elemente zur Beschreibung derartigen dynamischen Übertragungsverhaltens. Ein Ziel des vorliegenden Beitrags ist es daher, die auf dem Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperator basierende Methodik zur Modellbildung hysteresebehafteter Systeme durch die Einführung sogenannter Prandtl-Ishlinskii-Kriechoperatoren so zu erweitern, daß auch eine Berücksichtigung komplexer Kriechprozesse im Rahmen dieses Modellbildungsansatzes ermöglicht wird.

Der konsistente Entwurf echtzeitfähiger Kompensatoren für invertierbare hysteresee- und kriechbehaftete Übertragungssysteme ist eine komplexe Aufgabe, die eine simultane Lösung folgender gekoppelter Entwurfsschritte erfordert: Modellbildung des hysteresee- und kriechbehafteten Übertragungsverhaltens, Identifikation der Modellparameter zur Anpassung des Modells an das reale Übertragungsverhalten und die Invertierung des Modells zur Realisierung des Kompensators. Insbesondere hängt die mathematische Komplexität des Identifikations- und Invertierungsproblems entscheidend von der gewählten Modellbildungsmethode ab, die damit nachhaltig die Praktikabilität des Entwurfsverfahrens beeinflusst. Eine weitere Schwierigkeit des Identifikationsproblems resultiert aus der starken Empfindlichkeit der Modellparameter bezüglich unbekannter Fehler in den Meßdaten des Ausgang-Eingang-Übertragungsverhaltens sowie bezüglich unbekannter Modellfehler, die infolge nicht modellierter Effekte und nicht bekannter Modellordnungen entstehen. Aufgrund dieser Unsicherheiten resultiert aus der Identifikation im günstigsten Fall ein Modell mit reduzierter Vorhersagekraft, im ungünstigsten Fall jedoch ein nicht invertierbares Modell, was den gesamten Kompensatorentwurfsprozess in Frage stellt. Daher ist die Robustheit gegenüber diesen Unsicherheiten eine fundamentale Forderung, die an das Entwurfsverfahren zu stellen ist.

Das hier vorgestellte neue Entwurfsverfahren berücksichtigt diese Robustheitsanforderungen in Form von Ungleichungsnebenbedingungen für die Modellparameter. Aus der Berücksichtigung dieser Ungleichungsnebenbedingungen folgt, daß die Suche nach der besten l_2 -Norm-Approximation der Meßdaten des Ausgang-Eingang-Übertragungsverhaltens nur in den Parameterbereichen erfolgt, in denen das identifizierte Modell sicher invertierbar ist.

Literatur:

- [1] Ge, P.; Jouaneh, M.: Generalized Preisach Model for Hysteresis Nonlinearity of Piezoceramic Actuators. *Journal of Precision Engineering* 1997; 20: 99-111.
- [2] Krasnosel'skii, M.A.; Pokrovskii, A.V.: *Systems with Hysteresis*. Springer, Berlin 1989.
- [3] Krejci, P.: *Hysteresis, Convexity and Dissipation in Hyperbolic Equations*. Gakuto Int. Series Math. Sci. & Appl. vol. 8., Gakkotosho, Tokyo 1996.
- [4] Kuhnen, K.; Janocha, H.: Adaptive Inverse Control of Piezoelectric Actuators with Hysteresis Operators. In: *Proceedings of the European Control Conference*. Rubicom GmbH, Karlsruhe. 1999 (CD-ROM).
- [5] Schäfer, J.; Janocha, H.: Compensation of Hysteresis in solid-state Actuators. *Sensors and Actuators Physical A* 1995; 49: pp 97-102.

Informationsmodell für die Produkt- und Gerätedatenverwaltung

M. Heeg *

* Lehrstuhl für Prozessleittechnik

RWTH Aachen

Turmstr. 46, 52064 Aachen

Tel.: +49/241/80-5161

Fax: +49/241/8888-238

Email: michael.heeg@plt.rwth-aachen.de

U. Epple **

** Lehrstuhl für Prozessleittechnik

RWTH Aachen

Turmstr. 46, 52064 Aachen

Tel.: +49/241/80-4339

Fax: +49/241/8888-238

Email: epple@plt.rwth-aachen.de

Schlüsselwörter: Prozessbeschreibung, Produktbeschreibung, Gerätebeschreibung, Qualitätsmanagement, Merkmale

Der klassische Ansatz zur Qualitätssicherung von Produkten besteht heute im allgemeinen darin, dass der Herstellungsprozess signalorientiert überwacht und dokumentiert wird. Die für die Qualität eines Produktes wichtigen Prozesseigenschaften werden spezifiziert und deren Sensorsignalverläufe ohne explizite Semantik in Zeitreihenarchiven abgelegt. In einem solchen System ist zum Beispiel die Rückverfolgung eines aufgetretenen Fehlers im Herstellungsprozess eines Produktes nur mit viel Projektierungsaufwand möglich.

Eine wesentliche Anforderung an ein modernes Qualitätssicherungskonzept ist, dass es möglich ist, einfach und gezielt am Produkt aufgetretene Fehler und Qualitätsmerkmale bis zu ihrer Ursache zurück zu verfolgen. Dies erfordert zuerst ein einheitliches und durchgängiges Informationsmodell des zu überwachenden Produktionsprozesses. Ein solches Modell muss neben der Anlagenwelt sowohl die Produktwelt, die Prozesswelt, die Gerätewelt als auch die Ortswelt einbeziehen und diese Welten geeignet in Verbindung miteinander bringen. Ziel muss es sein, mit minimalem Projektierungsaufwand und direkter Navigierbarkeit an alle relevanten Merkmale eines Produktes und seiner Historie zu gelangen.

Ähnliche Anforderungen gelten auch für die Überwachung und Verwaltung von Geräten und Werkzeugen, da auch sie im Verlaufe eines Prozesses eine Reihe von Eigenschaftsänderungen erleiden. Im Sinne eines durchgängigen Asset Managements müssen alle relevanten Informationen über den gesamten Life-Cycle eines Geräts jederzeit direkt und projektierungsfrei erkundbar sein.

Zur Realisierung einer durchgängigen Informationsverwaltung für Produkte und Geräte erscheint ein neuer Ansatz zur Strukturierung von Prozessen erforderlich. Betrachtet man einen verfahrenstechnischen oder fertigungstechnischen Prozess, so werden heute üblicherweise die Prozesseigenschaften der anlagentechnischen Einheit, im allgemeinen der Teilanlage zugeordnet. Die Teilanlage ist jedoch ein funktionales Gebilde. Die eigentliche physikalische Realisierung des Prozesses erfolgt auf der Ebene der konkreten Produkte und Geräte. In der Verfahrenstechnik gehen Geräte und Produkte im allgemeinen keine Vermischung ein, d.h., sie tauschen zwar Energie, aber keinen Stoff aus. Die Systeme „Gerät“ und „Produkt“ sind damit zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort des Prozesses disjunkte physikalische Entitäten, ihnen können die Prozesseigenschaften einzeln zugeordnet werden. Die Idee ist nun, aus dieser Sicht ein Informationsmodell zu entwickeln, das nicht wie bisher üblich auf Teilanlagenprozesse, sondern verstärkt auf die beteiligten Geräte und Produkte ausgerichtet ist. Macht eine Teilung des Teilanlagenprozesses in Geräte- und Produktprozesse aufgrund der engen und komplexen Kopplung aus Sicht der mathematischen Modellierung zunächst wenig Sinn, so

kann sie aus informationstechnischen Gründen von Vorteil sein. Ergebnis wäre z.B. für jedes Gerät oder Produkt eine eigene Prozesskette über den gesamten Lebenszyklus der Entität. Das Modell sieht vor, daß jede Entität in einem Mutationsprozess (Erzeugung) entsteht, dann 0..n Transformationsprozesse durchläuft und schließlich in einem weiteren Mutationsprozess (Weiterverarbeitung, Verkauf) aus dem System verschwindet. Die Entitäten sind durch die Mutationsprozesse in Stammbäumen miteinander verbunden.

Ein solches Modell erlaubt die Festlegung einer Reihe von generischen Eigenschaften der Entitäten und ermöglicht eine nahezu projektierungsfreie Produkt- und Geräteverfolgung. Eine weitgehend automatische Dokumentation des Lebensweges wird unterstützt. Für eine Umsetzung des Modells sind jedoch noch eine Reihe von Fragen zu klären. Ein Kernpunkt ist dabei die Separation von Produkt- und Geräteprozessen in einer Teilanlage.

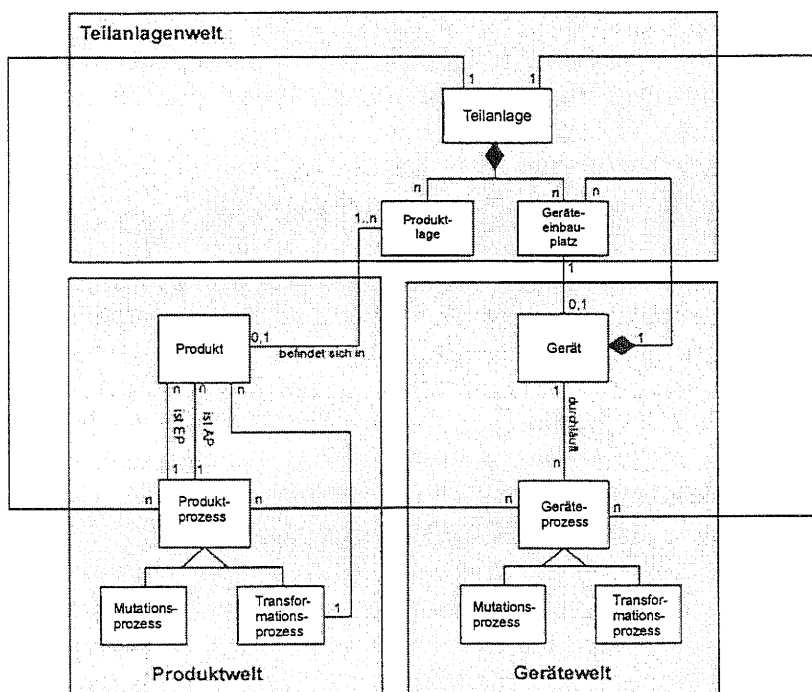


Abbildung 1: Integriertes Objektmodell.

Netzpendelverhalten des erweiterten europäischen Verbundnetzes bei deregulierter Energiewirtschaft

Dipl.-Ing. M. Kurth

Abt. Stromerzeugung und Automatisierungstechnik (IVD)
(Prof. Dr.-Ing. E. Welfonder)
Universität Stuttgart
Allmandring 5b, 70550 Stuttgart
Tel.: +49/685/6210
Fax: +49/685/6590
Email: kurth@ivd.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Europäisches Verbundnetz, Netzpendelungen, Dämpfungsverhalten, Leistungstransite

Mit der Ausdehnung des europäischen Verbundnetzes nach Osten sowie mit dem verstärkten Leistungstransit von Westen treten im Fall ungünstiger Netzbetriebskonstellationen ungenügend gedämpfte Netzpendelungen auf, die das gesamte Verbundnetz durchdringen.

Ursachen des schlechten Dämpfungsverhaltens sind neben der großen Verbundnetzausdehnung und dem zunehmenden Leistungstransit die hohen Verstärkungen bei den Spannungsreglern der Generatoren sowie bei den Drehzahlreglern innerhalb der Wasserkraftwerke, und zwar nicht die statischen Verstärkungen, sondern jeweils die im Bereich der Pendelperiodendauer von vier Sekunden wirksamen transienten Reglerverstärkungen.

Im Rahmen des Vortrages werden ausgehend von den Ursachen für die Entstehung von Netzpendelungen mögliche Gegenmaßnahmen aufgezeigt. Hierzu zählt neben der Reduktion der transienten Reglerverstärkungen der gezielte Einsatz sogenannter Power System Stabilizer, und zwar speziell in jenen Netzbereichen, wo die Pendelamplituden der dort wirksamen Netzfrequenzen besonders groß sind.

Die Untersuchungen erfolgen mittels eines detaillierten Netzdynamikmodells unter Nachbildung von über 550 Kraftwerksblöcken, 1100 Verbraucherregionen, d.h. dynamischen Lasten, sowie von 3000 Hochspannungsübertragungsleitungen und Transformatoren. Die Genauigkeit des Netzdynamikmodells wird anhand des Vergleichs von Messung und Simulationsrechnung belegt.

Die besondere Bedeutung der durchgeführten Untersuchungen ist u.a. daran zu ersehen, dass mit fortschreitender Deregulierung der elektrischen Energiewirtschaft mit größeren Leistungstransiten zu rechnen ist, die ihrerseits maßgeblich zur Entdämpfung des Pendeldämpfungsverhaltens beitragen.

Nichtlineare Regelung einer industriellen Reaktivdestillationskolonne

S.Grüner *
A. Kienle **

K.-D. Mohl *
E.-D. Gilles ****

* Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Tel.: +49/711/685-6569,6194
Fax: +49/711/685-6371
Email: {gruener,mohl}@isr.uni-stuttgart.de

** Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer
technischer Systeme Magdeburg
Zenit-Gebäude, Leipziger Str. 44, 39120 Magdeburg
Tel.: +49/391/6117-522,500
Fax: +49/391/6117-501
Email: {kienle,gilles}@mpi-magdeburg.mpg.de.

Schlüsselwörter: Nichtlineare Regelung, asymptotisch exakte Ein-/Ausgangslinearisierung, nichtlineare Beobachter, Reaktivdestillation.

Die Regelung von Reaktivdestillationskolonnen ist, aufgrund der komplexen Dynamik durch die Verkoppelung von Reaktion und Stofftrennung, eine anspruchsvolle Aufgabe. In diesem Beitrag wird die asymptotisch exakte Ein-/Ausgangslinearisierung [1] auf eine industrielle Reaktivdestillationskolonne angewendet. Dieses Regelungsverfahren basiert auf einer nichtlinearen Zustandsrückführung und setzt somit die Kenntnis des Prozeßzustandes voraus. Daher wird ein nichtlinearer Beobachter entworfen. Im Gegensatz zur exakten Ein-/Ausgangslinearisierung wird bei der asymptotisch exakten Ein-/Ausgangslinearisierung die Fehleraufschaltung, mit der man die Konvergenz des Beobachters gegen den Prozeßzustand sicherstellt, als Störung des Beobachtermodells interpretiert. Da diese Störung exakt bekannt ist, kann sie in der linearisierenden Zustandsrückführung aufgeschaltet und somit kompensiert werden. Damit erhält man ein exakt lineares Übertragungsverhalten von den Eingängen der Zustandsrückführung zu den Ausgängen des Beobachters. Schwingt nun der Beobachter asymptotisch auf den Prozeßzustand ein so wird dadurch auch die Prozeßdynamik asymptotisch exakt Ein-/Ausgangs linearisiert. Anhand dieser Überlegungen wird deutlich, daß die asymptotisch exakte Ein-/Ausgangslinearisierung ein robustes, nichtlineares Regelungsverfahren ist. Die Robustheit ist durch eine geeignete Fehleraufschaltung im Rahmen des Beobachterentwurfes sichergestellt. Um stationäre Beobachterfehler auszugleichen wird ein äußerer Regelkreis mit einfachen PI-Reglern hinzugenommen. Im Vergleich zu einem gut ausgelegten, robusten, linearen Mehrgrößenregler zeigt der entworfene nichtlineare Regler eine deutlich bessere Regelgüte sowohl hinsichtlich Sollwertsprüngen als auch Störungen, selbst wenn die Stellgrößen mit unbekanntem Verzögerungen beaufschlagt werden

Literatur:

[1] Groebel, M.J.; Allgöwer, F.; Storz, M. und Gilles, E.-D. : Asymptotically exact I/O-linearization of an industrial distillation column. In: Proc. ACC '95; pages 2648-2652.

Robuste Regelung der Wiederanlegelänge einer überströmten, rückwärtsgewandten Stufe

R. Becker, M. Garwon, C. Gutknecht

Fachgebiet Meß- und Regelungstechnik
Institut für Prozeß- und Anlagentechnik
Technische Universität Berlin
Hardenbergstraße 36a, 10623 Berlin
Tel.: +49/30/31424721
Fax: +49/30/31421129

Email: rb@regulus.fb10.tu-berlin.de (R. Becker)

Schlüsselwörter: abgelöste aerodynamische Strömung, Identifikation, robuste Regelung, rückwärtsgewandte Stufe

Die Ablösung von aerodynamischen Strömungen von Wänden ist oft mit negativen Effekten verbunden. So werden sowohl der erzielbare Auftrieb eines Tragflügels verringert als auch dessen Strömungswiderstand erhöht. Bei Strömungsmaschinen verursacht die Ablösung Druckverluste, Strömungslärm, schränkt den nutzbaren Betriebsbereich ein und führt allgemein zur Verringerung des Wirkungsgrades. Für die Ausnutzung von Durchmischungseffekten wird dagegen oft ein definiertes Ablösegebiet angestrebt. Nachdem passive Maßnahmen wie Formgebung, Spoiler etc. weitgehend ausgereizt sind, wendet sich die Strömungsmechanik seit einer Reihe von Jahren vermehrt aktiven Maßnahmen zu, um abgelöste Strömungen zu beeinflussen [1]. Die bisher auf diesem Gebiet durchgeführten Arbeiten umfassen insbesondere auf dem experimentellen Sektor fast ausschließlich Steuerungs- aber praktisch keine regelungstechnischen Maßnahmen.

Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist die gezielte Einstellung des Ablösegebiets hinter einer rückwärtsgewandten, laminar angeströmten Stufe mittels Regelung. Trotz der einfachen Geometrie mit fixierter Ablösekannte zeichnet sich das Strömungsfeld durch eine große zeitliche und räumliche Komplexität aus. Als Regelgröße wird in dieser exemplarischen Strömungskonfiguration die im mittleren Abstand x_r von der Stufenkante befindliche Wiederanlegelinie definiert, ab der keine Rückströmung mehr auftritt.

Für die Strömungsbeeinflussung werden Lautsprecher verwendet, die mit einem Schlauchsystem über einen Schlitz Schallsignale in die Scherschicht an der Stufenkante einbringen (siehe Abbildung 1). Hierdurch

werden Durchmischungsprozesse zwischen Rückströmgebiet und Scherschicht ange-regt und so zu einer Verkürzung der Wiederanlegelänge x_r beigetragen [2]. Die Größe des sich ausbildenden Ablösegebiets ist von der Anregungsamplitude und -frequenz sowie von der Reynoldszahl der Anströmung und von kanalspezifischen Größen abhängig. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchge-

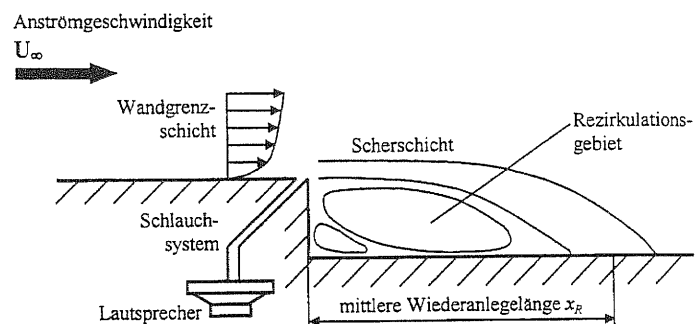


Abbildung 1: Prinzipbild des Strömungsfeldes hinter der rückwärtsgewandten Stufe

fürten Untersuchungen wird die Anregungsamplitude bei konstanter, auf die Reynoldszahl abgestimmter Frequenz variiert.

Für die Bestimmung der Wiederanlegelänge im Rahmen einer Echtzeitregelung kommen klassische Methoden der Strömungsmechanik nicht in Frage. Daher wurde ein auf Mikrofonmessungen basierendes Verfahren verwendet. Für die Stufenströmung ist bekannt, daß der Effektivwert des Schalldrucks im zeitlichen Mittel bei 90% der Wiederanlegelänge ein Maximum aufweist [3]. Zur Zeit wird dieser mit 14 in Strömungsrichtung hintereinander liegenden Mikrofonen bestimmt. Da die Wiederanlegelänge x_r starken zeitlichen Schwankungen unterliegt, erfolgt eine Mittelung der Mikrofonsignale und die Bestimmung der Lage des Schalldruckmaximums mittels Ausgleichspolynom.

Eine analytische Reglersynthese auf der Grundlage theoretischer Modelle, den Navier-Stoke'schen Gleichungen, ist zum heutigen Zeitpunkt ausgeschlossen. Es existieren aber erste aussichtsreiche Ansätze zur Reglersynthese auf der Basis von numerischen Lösungen oder aber reduzierter niederdimensionaler Modelle, die jedoch einen sehr großen Rechenaufwand bzw. detailliertes Wissen über die ablaufenden strömungsmechanischen Effekte erfordern. Über Experimente und damit die Umsetzung einer echtzeitfähigen Regelung zur Strömungsbeeinflussung liegen bisher nur sehr wenige, zu der vielbeachteten rückwärts-gewandten Stufe gar keine Berichte vor. Das Hauptziel der vorgestellten Arbeiten ist daher die experimentelle Umsetzung eines geschlossenen Regelkreises sowie die Gewinnung erster Erfahrungen bezüglich der Signalauswertung, Modellbildung und Reglersynthese.

Im Rahmen der regelungstechnischen Modellbildung werden zum besseren Verständnis der auftretenden Effekte auch Simulationsstudien basierend auf den Navier-Stoke'schen Gleichungen durchgeführt. Sowohl Simulationen als auch Experimente zeigen, daß sich das dynamische Verhalten der Stufe bei sprungförmiger Änderung der Aktuation erstaunlich gut durch black-box-Modelle beschreiben läßt. Die Modellparameter hängen jedoch stark nichtlinear von der Anströmgeschwindigkeit und der Sprunghöhe ab. Auf dieser Grundlage werden zur Regelung der Wiederanlegelinie ein robuster PI-Regler, ein H_∞ -Regler sowie ein robuster Smith-Prädiktor mit eingangsseitiger Kompensation der nichtlinearen Verstärkungskennlinie entworfen. Über erste Ergebnisse wird berichtet.

Literatur:

- [1] Fiedler, H. E.; Fernholz, H. H.: On management and control of turbulent shear flows. Progr. Aeronaut. Sci. 27, 1990, 305-387
- [2] Huppertz, A.; Janke, G.: Preliminary experiments on the control of three-dimensional modes in the flow over a backward-facing step. Advances in Turbulence VI, 1996, 461-464
- [3] Mabey, D.: Analysis and correlation of data on pressure fluctuation in separated flow. J. Aircraft 9 (9), 1972, 642-645

Auslegung robuster Autopilotenfunktionen mit nichtlinearer dynamischer Inversion

G. Looye, J. Bals

Institut für Robotik und Mechatronik Oberpfaffenhofen
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
82234 Weßling

Tel.: +49 (8153) 28-1068, Email: gertjan.looye@dlr.de

Kurzfassung

Der vorliegende Beitrag behandelt die Anwendung der nichtlinearen dynamischen Inversion zur Auslegung eines robusten Lagereglers für ein Zivilflugzeug. Dieser Regler dient zur Verbesserung der Flugeigenschaften einschließlich der Stabilität der Flugzeugdynamik. Die erforderliche Robustheit wird durch einen mehrzieligen Multi-Modell Optimierungsansatz und lokale Robustheitskriterien erreicht. Dabei werden neben den Rückführverstärkungen auch Werte physikalischer Parameter des inversen Modells optimiert, die im Streckenmodell als unsicher gelten. Die Erzeugung der inversen Regelgesetze aus symbolischen Modelica-Flugzeugdynamikmodellen erfolgt automatisch. Der Regler wurde als Basisregler für ein automatisches Fly-by-wire Landesystem eingesetzt und in Flugversuchen erfolgreich erprobt.

Schlüsselwörter

Flugregelung, Autopilot, nichtlineare dynamische Inversion, Feedback Linearisierung, mehrzielige Optimierung, Multi-Modell Ansatz, Objektorientierte Modellierung.

Stand der Technik

Dynamische Inversion ist ein Spezialfall der Feedback Linearisierung [1], bei dem die Ausgangsgleichungen für die Regelgrößen y_1 nur einmal differenziert werden müssen, damit die Stellgrößen u explizit in den differenzierten Gleichungen auftreten. Diese Gleichungen werden invertiert und als Regelgesetz implementiert, siehe Abb. 1. Es entsteht das lineare Übertragungsverhalten $1/s$ zwischen den neuen Eingangsgrößen \dot{y}_1 und den Regelgrößen y_1 . Mit Hilfe von linearen Rückführungen (z.B. PI) wird schließlich die gewünschte Dynamik erzeugt.

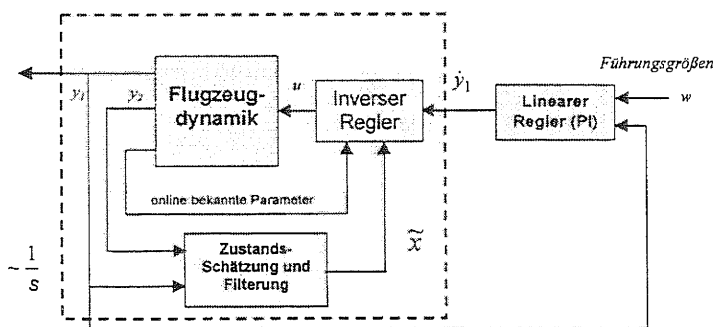


Abbildung 1: Reglerstruktur mit dynamischer Inversion

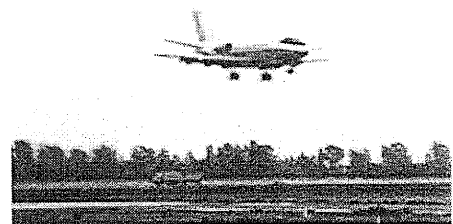


Abbildung 2: Erprobung im Landeanflug

Dieses Verfahren wurde im Bereich der Flugregelung bereits in verschiedenen experimentellen Kampfflugzeugprogrammen eingesetzt [2]. Ein großer Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass die stark nichtlineare Flugdynamik kompensiert wird und das sonst übliche Gain-Scheduling nicht explizit erforderlich ist, um ausreichende Regelgüte für alle Konfigurationen und Flugzustände zu gewährleisten.

Problemstellung

Bei der Anwendung der dynamischen Inversion gibt es jedoch unter anderem folgende Probleme:

- Robustheit gegenüber Modellabweichungen, da jede Abweichung eine nicht vollständige Kompensation der Nichtlinearitäten zur Folge hat,
- die Erstellung der inversen Regelgesetze inkl. Invertierung, Implementierung und Verifikation ist für komplexe Modellgleichungen aufwändig und fehleranfällig.

Problemlösung

Ein möglicher Ansatz für das Robustheitsproblem ist die Anwendung robuster Methoden für den linearen Teil des Reglers, wie z.B. μ -Synthese [3]. Hier wird dagegen der Ansatz einer möglichst parameterrobusten Festlegung der freien Syntheseparameter gewählt. Dazu wird mehrzielige Optimierung mit einem Multi-Modell Ansatz [4], [5] verwendet. Im Einzelnen werden dabei vier Maßnahmen kombiniert, um die geforderte Robustheit zu erreichen:

- Über den Multi-Modell Ansatz wird eine bestimmte Anzahl von worst-case Fällen bezüglich Flugzuständen und Parameterabweichungen zwischen Streckenmodell und inversem Modell parallel ausgewertet. Damit lässt sich Robustheit global, d.h. über große Parameterbereiche abdecken.
- Für jedes Modell werden neben den nichtlinearen Performanzkriterien (z.B. Anstiegszeit aus nichtlinearer Simulation) lineare, lokale Robustheitskriterien wie Phasen- und Amplitudenreserven berechnet.
- Die unsicheren physikalischen Modellparameter lassen sich in die Kategorie „online-bestimmbar“ durch Messung und Schätzung, wie z.B. Masse, und in die Kategorie „völlig unsicher“ innerhalb eines angegebenen Intervalls einteilen. Die erste Kategorie wird dem inversen Modell ständig zugeführt, was einem automatischen Gain-Scheduling gleichkommt (Abb. 1).
- In die zweite Kategorie fallen z.B. die aerodynamischen Beiwerte im Landefall. Für das inverse Modell muss ein fester Nominalwert aus dem Unsicherheitsintervall gewählt werden. Hier wird ein neuer Ansatz vorgeschlagen, diese Nominalwerte als zusätzliche Optimierungsparameter des Gesamtreglers aufzufassen. Es hat sich gezeigt, dass sowohl Regelgüte- als auch Robustheitskriterien sehr sensitiv auf diese Parameter reagieren.

Das flugdynamische Gesamtmodell wurde in der objektorientierten Modellierungssprache Modelica erstellt [6]. Durch Vertauschen von Eingangs- mit Ausgangsgrößendefinition lässt sich das inverse Modell automatisch und fehlerfrei aus dem validierten Muttermodell erzeugen [6]. Natürlich muss die Stabilität der Null-Dynamik geprüft werden. Bei der Flugdynamik tritt dieses Problem häufig auf, lässt sich jedoch mit einfachen Maßnahmen lösen.

Ergebnis

Der Regler hat sich in Parameterstudien und Monte Carlo Simulationen als sehr leistungsfähig und robust erwiesen. Als Teil eines Autopiloten wurde der Regler im Rahmen des EU Projekts REAL (Robust and Efficient Autopilot control Laws design) in mehreren Flugversuchen erfolgreich getestet (Abb 2).

Literatur:

- [1] Slotine, Jean Jacques E. and Li, Weiping, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, 1991.
- [2] Enns, Dale, Bugajski, Dan, Hendrick, Russ, and Stein, Gunter, Dynamic Inversion: An Evolving Methodology for Flight Control Design, AGARD Conference Proceedings 560: AGARD, Active Control Technology: Applications and Lessons Learned, pp. 7-1 - 7-12, Turin, Italy, May 1994.
- [3] Adams, Richard J. and Banda, Siva S., Robust Flight Control Design Using Dynamic Inversion and Structured Singular Value Synthesis, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 1(2), June 1993.
- [4] Joos, H.-D., Varga, A., Finsterwalder, R., Bals, J.: Eine integrierte optimierungsbasierte Entwurfsumgebung für Flugregelungsaufgaben. at - Automatisierungstechnik, 47. Jahrgang, Heft 6, S. 239-248, 1999.
- [5] Kreisselmeier, G. und Steinhauser, R., Systematische Auslegung von Reglern durch Optimierung eines vektoriellen Gütekriteriums, Regelungstechnik, Heft 3, S. 76-79, 1979.
- [6] Moormann, D., Mosterman, P.J., Looye, G, Object-oriented computational model building of aircraft flight dynamics and systems. Aerospace Science and Technology, Volume 3 (3), Elsevier, April 1999.

Adaptiver λ -Trajektorienfolgeregler für nichtlineare Systeme mit höherem relativen Grad

E. Bullinger *

F. Allgöwer **

* Institut für Systemtheorie technischer Prozesse
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Tel.: +49/711/685 7752
Fax: +49/711/685 7735
Email: bullinger@ist.uni-stuttgart.de

** Institut für Systemtheorie technischer Prozesse
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Tel.: +49/711/685 7733
Fax: +49/711/685 7735
Email: allgower@ist.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Adaptive Regelung, hohe Verstärkung, robuste Stabilisierung, universelle Stabilisierung

Bei vielen Regelungsanwendungen sind keine guten Modelle vorhanden, oder die Modellparameter sind nur ungenau bekannt. Eine Möglichkeit, solche Systeme zu regeln, ist, einen adaptiven λ -Trajektorienfolgeregler zu verwenden. Um diesen Regler zu entwerfen, ist nur die Kenntnis der Modellstruktur nötig, nicht die der genauen Parameterwerte.

Exaktes Trajektorienfolgen ist in vielen Anwendungen nicht notwendig. Auf Grund der benötigten Regelgüte und der Qualität der Messungen kann der Benutzer angeben, wie klein der Regelfehler sein soll. Das Regelziel bei λ -Trajektorienfolgen ist, daß der Ausgangsfehler $y-y_{ref}$ asymptotisch gegen $[\lambda, -\lambda]$ geht, wobei λ die vom Benutzer spezifizierte Toleranz ist. Dies ist äquivalent zur Forderung, daß der Systemausgang zum Streifen von der Breite 2λ um die Referenztrajektorie strebt.

Die meisten Regler, die λ -Trajektorienfolgen erreichen, können nur für Systeme mit Relativgrad eins angewendet werden. Der in dieser Arbeit vorgeschlagene adaptive λ -Trajektorienfolgeregler erweitert die Systemklasse auf Systeme mit höherem Relativgrad. Dies wird dadurch erreicht, daß der Regler einen Beobachter enthält, der den Ausgang und dessen erste $r-1$ Ableitungen schätzt. Eine weitere Komponente des Reglers ist eine beobachterbasierte Zustandsrückführung. Sowohl der Beobachter als auch die Zustandsrückführung enthalten einen Verstärkungsparameter, die Reglerverstärkung k . Für genügend große Werte dieses Parameters erreicht der Regler λ -Trajektorienfolgen. Anstatt diesen Parameter a-priori festzulegen, wird das folgende Adaptionsschema benutzt: Der Parameter k wird erhöht, falls der Ausgang außerhalb des λ -Streifens ist, und wird im Streifen konstant gehalten. Dies erlaubt es, mit einem relativ kleinen Wert für k zu starten und trotzdem Robustheit für eine große Klasse von Unsicherheiten zu haben.

Der adaptive λ -Trajektorienfolgeregler hat eine relativ einfache Struktur und kann verhältnismäßig einfach angewendet werden. Das Einstellen der wenigen Reglerparameter zum Erreichen von λ -Trajektorienfolgen ist recht einfach. Die Hauptnachteile des adaptiven λ -Trajektorienfolgereglers sind zum einen, daß die Regelgüte nicht direkt in den Entwurf eingeht und zum zweiten daß die Reglerverstärkung k groß werden kann. So ist es zum Beispiel möglich, daß der Regler den Trajektorienfolgefehler nur langsam verkleinert, besonders bei langsamer Adaption. Außerdem können während der transienten Phase Zustände kurzfristig sehr weit von der stationären Ruhelage weggetrieben werden. Dies passiert insbesondere dann, wenn die Reglerverstärkung k sehr groß ist. Eine große Reglerverstärkung erhöht außerdem die Sensitivität gegenüber Meßrauschen.

Der adaptive λ -Trajektorienfolgereger wurde für eine Regelung der Anästhesietiefe bei klinischen Operationen angewendet. Dabei soll die endtidale Konzentration des Anästhesiegases nahe bei dem vom Anästhesisten gewählten Referenzwert, der sich während einer Operation mehrmals ändert, gehalten werden. Es wird gezeigt, daß, nach geeigneten Modifikationen, der adaptive λ -Trajektorienfolgereger eine zufriedenstellende Regelgüte erreicht, obwohl er keine Patienteninformationen benötigt. Diese Anwendung ist in Kooperation mit dem Institut für Anästhesiologie des Inselspitals Bern und dem Institut für Automatik der ETH Zürich durchgeführt worden.

Literatur:

- [1] Bullinger, E.; Allgöwer, F.: Adaptive λ -tracking for nonlinear systems with higher relative degree, im Tagungsband der Conference on Decision and Control, (2000), Sydney, Australien.
- [2] Bullinger, E.: Adaptive λ -tracking for systems with higher relative degree, Diss., ETH Zürich, 2000.

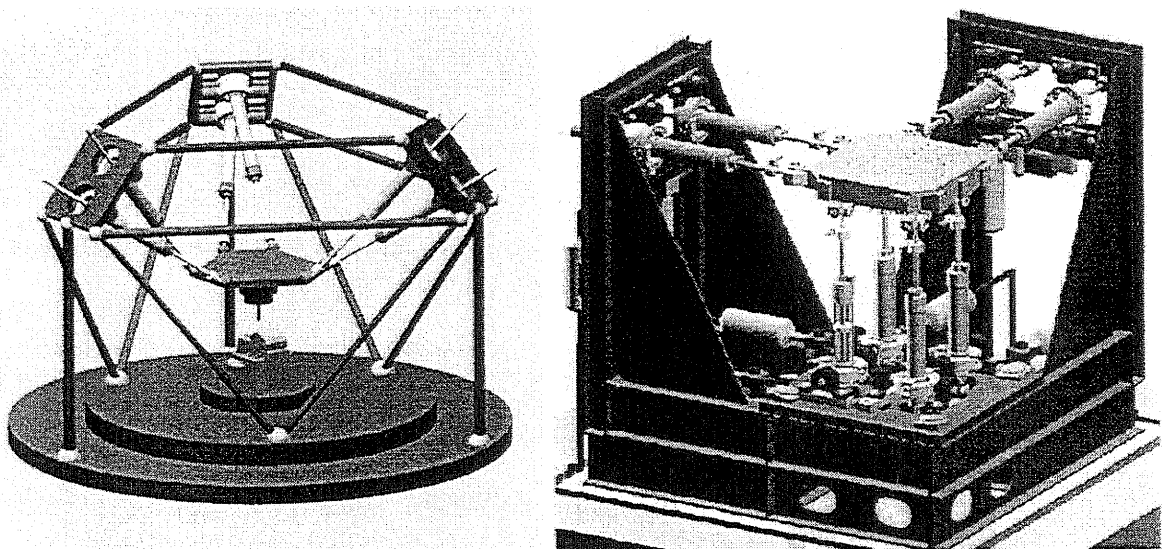
Modellbildung, Regelung und Rechnersimulation räumlicher servopneumatischer Parallelroboter

W. Klier, H. Hahn

Fachgebiet Regelungstechnik und Systemdynamik
Universität Gh Kassel
Mönchebergstraße 7, 34109 Kassel
Tel.: +49/561804-3260
Fax: +49/561804-7768
Email: hahn@uni-kassel.de

Schlüsselwörter: Parallelroboter, mechatronisches System, Modellbildung, nichtlineare Regelung, Rechnersimulation

In diesem Beitrag werden unterschiedliche nichtlineare und lineare **Regelungskonzepte** für **räumliche servopneumatische Parallelroboter** mit redundanten und nicht redundanten Antriebskonfigurationen entworfen, mittels Rechnersimulationen und Laborexperimenten überprüft und in ihrer Wirksamkeit miteinander verglichen. Parallelroboter (vgl. Bild 1) stoßen zur Zeit in der Fertigungs-, Handhabungs- sowie in der Luft- und Raumfahrttechnik auf großes Interesse [1]. Den vielen Vorteilen dieser Roboter (u.a. hohe Tragfähigkeit, hohe Struktursteifigkeit, hohe Lagegenauigkeit und einfache Bauweise aus Standardteilen) stehen einige Nachteile gegenüber (u.a. relativ geringe Anzahl wissenschaftlicher Untersuchungen, komplexe nichtlineare mathematisch-physikalische Modelle und hohe Anforderungen an die Regelung und Reglerhardware). Servopneumatische Antriebe sind einerseits preiswert und umweltfreundlich. Sie haben aber aufgrund des schwach gedämpften und weichen Arbeitsmediums Luft und der relativ hohen Reibkräfte den Nachteil, daß sie nur mit großem Aufwand präzise und schnell zu regeln sind. Die Kombination von Parallelrobotern mit servopneumatischen Antrieben stellt somit ein sehr komplexes mechatronisches System dar, das eine anspruchsvolle modellbasierte Regelung benötigt [2],[3].



(a) Hexapode mit 6 nichtredundanten Antrieben (b) Mehrachsenprüfstand mit 8 redundanten Antrieben

Bild 1: Computergraphiken räumlicher Parallelroboter

Teilmodelle des Parallelroboters: Die hier diskutierten Regler basieren auf folgenden Teilmodellen des Roboters:

- Modelle der Ventile und der Arbeitszylinder von n_A servopneumatischen Antrieben in unterschiedlichen geometrischen Anordnungen (vgl. Bild 1).
- Modelle der Robotermechanik mit $(2n_A+1)$ Starrkörpern für den Endeffektor und die Zylinderkolben und Zylindergehäuse der Antriebe und mit $n_A \geq 6$ kinematisch geschlossenen Ketten.

Untersuchte Regelkonzepte: In diesem Beitrag werden folgende nichtlinearen und linearen Regelkonzepte untersucht:

- nichtlineare und lineare Multisensorregler,
- nichtlineare und lineare Computed-Force Regler,
- nichtlineare Regler nach dem Verfahren der Ein-/Ausgangslinearisierung,
- lineare Entkopplungs- und Kompensationsregler,
- nichtlineare Gain-Scheduling Regler,
- nichtlineare Sliding-Mode Regler und
- lineare H_∞ -Regler.

Bewertungskriterien der Regler: Die unterschiedlichen Regelkonzepte werden nach folgenden Bewertungskriterien verglichen:

- Entwurfsaufwand bezüglich der Ableitung und Validierung des Robotermodells, der experimentellen Identifikation der Modellparameter sowie des Berechnungsaufwandes des Regelalgorithmus.
- Regelgüte bezüglich der Folgegenauigkeit (Führungs- und Entkopplungsverhalten), der Parameterempfindlichkeit und der Störemfindlichkeit.
- Implementierungsaufwand und Implementierbarkeit in Abhängigkeit von der Komplexität der Regelalgorithmen, der benötigten Meßgrößen (Sensoraufwand und Kosten), der benötigten Modellparameter und der Echtzeitfähigkeit (Hardwareaufwand und Kosten).

Erzielte Ergebnisse: In dem Vortrag werden die mit verschiedenen Regelalgorithmen und Testsignalen (u.a. mit transienten Testsignalen als modifizierten räumlichen Erdbebensignalen sowie mit quasistationären Testsignalen (Sinussweepsignalen)) erzielten Simulationsergebnisse diskutiert und nach den obigen Kriterien bewertet. In laufenden Laborexperimenten werden die obigen Regler in Hinblick auf ihre praktische Verwendbarkeit und ihre Einsatzmöglichkeiten überprüft.

Literatur:

- [1] Merlet, J.-P.: Parallel Manipulators: State of the Art and Perspectives, in International Journal of Advanced Robotics, Vol. 8(6), pp. 589-596, 1994.
- [2] Hahn, H.; Klier, W.: Nonlinear Control of a Multi-Axis Servopneumatic Test Facility with Redundant Actuators, in Proceedings of the International Conference on Systems, Signals, Control, Computers, Vol. II, pp. 461-465, Durban, South Africa, 1998.
- [3] Klier, W.; Hahn, H.: Mathematisch-physikalische Modellgleichungen und Regelungsstrategien räumlicher servopneumatischer Parallelroboter, im Tagungsband zur VDI/VDE-GMA Fachtagung Robotik 2000, Vol. 1552, pp. 71-76, VDI, 2000.

Vortragsskizzenfassung

Referent: Dipl.-Ing. Rashid Nawaz

Modulares Koordinatentransformations- und Bahninterpolatormodell für redundante Roboterkinematiken

Für die Steuerung von Roboterkinematiken ist die direkte und inverse Koordinatentransformation die zentrale steuerungstechnische Aufgabe. Mittels der direkten Koordinatentransformation erfolgt beim Programmieren von Bewegungsbahnen des Tool-Center-Points (TCP's) eine Transformation der gemessenen Gelenkkordinaten der einzelnen Achsen in die kartesischen Koordinaten (Lage- und Orientierungswerte) des TCP's. Das Ergebnis dieser direkten Transformation sind Lage- und Orientierungswerte für eine programmierte Bahnkurve des TCP's im kartesischen Raum. Diese Sollwertdatensätze werden im Bahnprogramm Speicher der Robotersteuerung abgelegt. Sie bilden den Ausgangspunkt für die inverse Transformation, die für die Berechnung der einzelnen Gelenkwerte bei Berücksichtigung bzw. Einhaltung der geforderten Bahngeschwindigkeit aus den abgelegten Sollwertdatensätzen in der Bewegungsphase (der sogenannten Runtime-Phase) für die Bahninterpolation (Grob- und Feininterpolator) bereitzustellen sind. Die Ausgangswerte des Feininterpolators werden dann als Lagesollwerte den Lagereglern der einzelnen Achsgelenke zugeführt.

Ausgehend von diesem Grundprinzip wird im Vortrag ein Koordinatentransformationsmodell vorgestellt, das erstens für redundante Kinematiken einsetzbar ist (ein- und zweifache Überbestimmung) und zweitens für eine beliebige Anordnung von Sieben- bzw. Achtsachskinematiken einsetzbar ist.

Das Modularitätsprinzip ermöglicht den Entwurf von kinematischen Ketten unterschiedlicher Kombination von translatorischen und rotatorischen Achsen.

Die für die Modularität und Redundanz notwendige Transformationsvorschrift und ausgewählte Simulationsergebnisse (Soll-/Istbahnkurven und Singularitäten, berechnet mit MATLAB-Tools bzw. Mathematica) werden vorgestellt und diskutiert.

Die experimentellen Ergebnisse, durchgeführt an einem Siebenachsroboter, werden mit den Simulationsergebnissen einer entsprechenden Modellkinematik verglichen und ausgewertet.

Bahnfolgeregelung seilgeführter Handhabungssysteme

T. Maier *

* Institut für Antriebstechnik und Mechatronik
Universität Rostock
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18051 Rostock
Tel.: +49/381/4983093
Fax: +49/381/4983085
Email: thomas.maier@mbst.uni-rostock.de

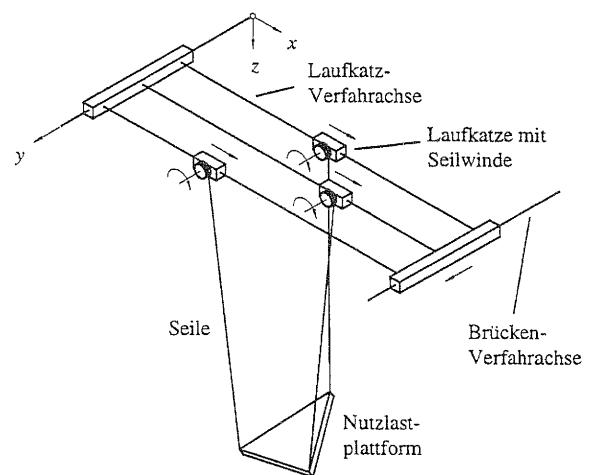
C. Woernle **

** Institut für Antriebstechnik und Mechatronik
Universität Rostock
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18051 Rostock
Tel.: +49/381/4983084
Fax: +49/381/4983085
Email: christoph.woernle@mbst.uni-rostock.de

Schlüsselwörter: Seilgeführtes Handhabungssystem, flaches System, Vorsteuerung, Bahnfolgeregelung

Bei seilgeführten Handhabungssystemen wird eine Nutzlastplattform an mehreren räumlich angeordneten Seilen geführt, deren Seilwinden auf verfahrbaren Laufkatzen angeordnet sind. Wie bei Robotern kann eine Handhabung der Nutzlast mit bis zu sechs Freiheitsgraden der Bewegung im Raum erreicht werden. Seilgeführte Handhabungssysteme verbinden die krantypische Handhabung hoher Nutzlasten in großen Arbeitsräumen mit der Beweglichkeit von Robotern. Sie können dort eingesetzt werden, wo einerseits Krane die erforderlichen Bewegungsfreiheitsgrade und Positioniergenauigkeiten nicht bereitstellen können und andererseits die Abmessungen und die Masse der handzuhabenden Objekte sowie die Größe des Arbeitsraums den Einsatz von Robotern ausschließen. Beispiele sind die Montage von Baugruppen im Schiff- und Flugzeugbau.

Am Institut für Antriebstechnik und Mechatronik der Universität Rostock wird derzeit das in der Abbildung dargestellte seilgeführte Handhabungssystem CABLEV entwickelt, das eine Nutzlastplattform an drei räumlich angeordneten Seilen führt. Die zugehörigen Seilwinden sind auf Laufkatzen angeordnet, die sich auf parallelen Führungsbahnen einer gemeinsamen Kranbrücke bewegen. Dieses Handhabungssystem weist eine kinematisch unvollständige Lastführung auf, d. h. für gegebene Positionen der Kranbrücke und der drei Laufkatzen sowie gegebene Längen der drei Seile ist die Lage der Nutzlastplattform kinematisch nicht eindeutig festgelegt, da sie auch bei festgehaltenen Antrieben Pendelschwingungen mit dem Freiheitsgrad drei ausführen kann [1].



Seilgeführtes Handhabungssystem
CABLEV.

Es wird eine Lageregelung entworfen, welche die Nutzlastplattform entlang gewünschter Bahnen im Raum führt. Die Eingangsgrößen des Systems sind die Stellkräfte und -momente am Brückenantrieb sowie an den Katzen- und Windenantrieben, die Ausgangsgrößen sind die Lagekoordinaten der Nutzlastplattform. Für den Reglerentwurf wird ausgenutzt, daß die Ausgangsgrößen flach sind: Die Eingangs- und Zustandsgrößen können als Funktionen der Ausgangsgrößen und einer endlichen Anzahl ihrer zeitlichen Ableitungen ausgedrückt wer-

den [2, 3]. Hierdurch wird eine Vorsteuerung erhalten, welche die Nichtlinearitäten der Regelstrecke kompensiert, so daß sich insgesamt eine lineare und entkoppelte Systemdynamik ergibt. Die Vorsteuerung besteht aus zwei hintereinander geschalteten Teilsystemen: Im ersten Teilsystem werden aus den gegebenen Referenzverläufen der Lagekoordinaten der Nutzlastplattform die erforderlichen Verläufe der Antriebskoordinaten berechnet (verallgemeinerte inverse Kinematik). Im nachgeschalteten zweiten Teilsystem werden die zur Realisierung der Antriebsbewegungen notwendigen Stellkräfte und –momente ermittelt (inverse Dynamik). Die Vorsteuerung bei den seilgeführten Handhabungssystemen mit kinematisch unvollständiger Lastführung kann als Verallgemeinerung der Vorsteuerung konventioneller Roboter mit starren Armsegmenten und kinematisch vollständiger Lastführung angesehen werden. Durch voneinander unabhängige Zustandsregler für die Bahnabweichungen in den Lagekoordinaten der Nutzlastplattform wird eine asymptotisch stabile Bahnfolgeregelung erreicht.

Die Vorgehensweise wird am Beispiel eines Brückenkrans, der eine Punktlast an einem Seil führt und damit ebenfalls zu den seilgeführten Handhabungssystemen mit kinematisch unvollständiger Lastführung gezählt werden kann, dargestellt und auf das seilgeführte Handhabungssystem CABLEV übertragen.

Literatur:

- [1] Maier, T.; Woernle C. (2000): Simulationsgestützter Entwurf der Bahnsteuerung eines seilgeführten Handhabungssystems. Erschienen in: Tagungsband zur Dresdner Tagung Simulation im Maschinenbau, 501-518.
- [2] Fliess, M.; Lévine, J.; Martin, P.; Rouchon, P. (1995): Flatness und Defect of Nonlinear Systems: Introductory Theory and Examples. *International Journal of Control* 61, 1327-1361.
- [3] Rothfuß, R.; Rudolph, J.; Zeitz, M. (1997): Flachheit: Ein neuer Zugang zur Steuerung und Regelung nichtlinearer Systeme. *Automatisierungstechnik* 45, 517-525.

Walk! - Ein kooperatives, neuroprothetisches System zur Wiederherstellung des Ganges

T. Fuhr

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik
 Technische Universität München
 80290 München
 Tel.: +49-89-289-28396, Fax: +49-89-289-28340
<http://www.lsr.ei.tum.de>
 Email: thomas.fuhr@ei.tum.de

Schlüsselwörter: Funktionelle elektrische Stimulation (FES), Gang, Regelung, Überwacher

Nach einer vollständigen Läsion des Rückenmarks, z. B. bei einer Querschnittlähmung, können weder Bewegungskommandos des zentralen Nervensystems (ZNS) zur Zielmuskulatur, noch sensorische Information aus der Peripherie zum ZNS weitergeleitet werden - die betroffenen Extremitäten sind gelähmt. Durch den Einsatz motorischer Neuroprothesen können verlorengegangene Bewegungsfunktionen mit Hilfe künstlicher, elektrischer Reize teilweise wiederhergestellt werden. Derzeit klinisch angewandte Neuroprothesen sind gesteuerte Systeme, deren Mobilitätsgewinn bislang nur gering ist. Störungen durch Muskelermüdung, Spastik oder externe Einflüsse können nicht kompensiert werden. Für Einzelgelenkbewegungen und auch einzelne Bewegungsabläufe, wie dem Aufstehen, Stehen und Hinsetzen in Simulation und Experiment konnte gezeigt werden [1, 2], daß *geregelt* Systeme die Leistungsfähigkeit verbessern. Systeme, die alle zur Fortbewegung relevanten Bewegungsabläufe vereinen, fanden bislang zu wenig Beachtung.

Besondere Anforderungen an die Entwicklung von Neuroprothesen stellt die erwünschte und notwendige Interaktion zwischen Mensch und technischen Systemkomponenten dar. Der Patient ist hier nicht nur Bediener, sein gelähmter Unterkörper beschreibt zusammen mit dem Neurostimulator das

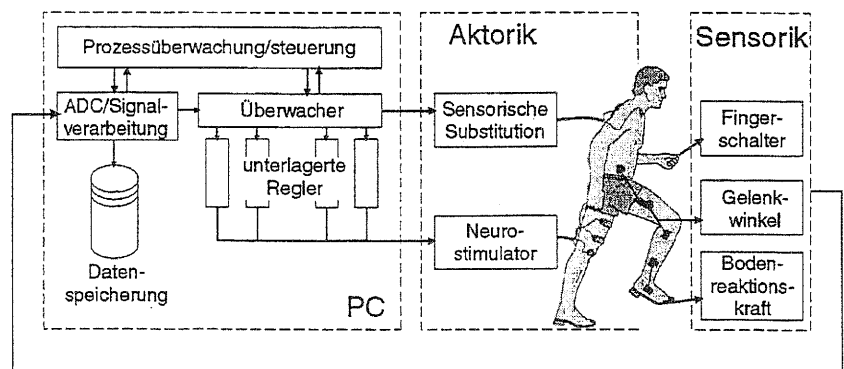


Abbildung 1: Systemstruktur

aktorische Teilsystem. Zusätzlich agiert neben der Neuroprothese noch die natürliche, intakte Oberkörpermotorik des Patienten zur Gleichgewichtsregelung als zweites Regelsystem auf der gleichen Regelstrecke. Es ist zu vermeiden, daß die zwei Regelungssysteme in Konkurrenz treten oder dem Patienten Bewegungen aufgezwungen werden. Eine Neuroprothese muß als assistives System die vom Patienten gewünschten Bewegungen unterstützen. Beim Regelungsentwurf müssen diese erwünschten Wechselwirkungen zwischen Patient und technischem System ebenso wie die nur mit großem Aufwand identifizierbaren, stark nichtlinearen und zeitvarianten Eigenschaften des neuromuskulären Systems berücksichtigt werden. Gleichzeitig muß aber die Komplexität des Gesamtsystems, die durch den zusätzlichen Bedarf von Sensoren und damit einhergehenden Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen erhöht wird, so gering wie möglich gehalten werden, um von den Patienten akzeptiert zu werden.

Am LSR wurde in Zusammenarbeit mit Neurologen des Universitätsklinikums Großhadern eine geregelte Gang-Neuroprothese entwickelt (Abb. 1). Zur künstlichen elektrischen Reizung wird ein kommerzieller 8-Kanal Neurostimulator eingesetzt, mit dem an jedem Bein 3 Muskelgruppen und der sogenannte Flexorreflex über Oberflächenelektroden aktiviert werden. Der Patient kann mit Hilfe von Fingerschaltern einzelne Bewegungsabläufe auslösen. Die Ansteuerung erfolgt über einen PC. Das zur Regelung verwendete Sensorsystem besteht aus Goniometern zur beidseitigen Messung der Kniegelenkwinkel und Kraftmeßsohlen zur Messung der Bodenreaktionskraft. Um den Patienten diese Bewegungsinformation zugänglich machen zu können, wurde zusätzlich ein System zur sensorischen Substitution entwickelt, bei der am Oberkörper angebrachte Miniaturvibratoren den Bewegungszustand der Beine in Form von taktiler Information darstellen.

Die Regelung ist hierarchisch strukturiert und erfolgt durch einen Überwacher, der mit Hilfe der Sensorinformation zu geeigneten Zeitpunkten zwischen den einzelnen diskreten Bewegungsphasen umschaltet. Für jede Bewegungsphase ist ein unterlagerte Regler zuständig, der die einzelne Muskelgruppen aktiviert und damit kontrollierte Bewegungen realisiert.

Ein Schritt wird in drei Phasen realisiert. Zuerst werden durch Reizung des Flexorreflexes am Schwungbein Hüft-, Knie- und Fußgelenk gebeugt. Sobald die Beugung des Knies einen Schwellwert überschreitet, folgt die Streckung des Knies. Bei Detektion von Bodenkontakt des Schwungbeines wird in der letzten Phase durch Hüftstreckung der Oberkörper stabilisiert. Ein Knieextensionsregler sorgt für die gewünschte Kniestreckung während des Standes und der späteren Schwungphase bei minimaler Muskelaktivierung. Da bei diesen Bewegungsabläufen das exakte Folgen einer Trajektorie nicht relevant ist, kann auf eine zeitkontinuierliche Regelung verzichtet werden. Deshalb wird ein Schaltregler eingesetzt, der in Abhängigkeit vom Kniewinkel, beschrieben durch die drei diskreten Zustände *Flexion*, *Extension*, und *Hyperextension*, die Reizintensität der Kniestreckermuskulatur innerhalb festgelegter Grenzen erhöht, konstant hält, oder senkt und somit die benötigte Energie minimieren kann.

Im Vortrag werden unter anderem Ergebnisse der im Sommer 2000 mit drei komplett querschnittgelähmten Patienten durchgeführten Experimente vorgestellt. Es wird gezeigt, daß der Einsatz einfacher Regelungsansätze die Leistungsfähigkeit der Gang-Neuroprothese signifikant erhöht und dabei den Patienten entlastet. Die Bewegungskontrolle des Patienten wird durch die Verwendung von sensorbasierten Transitionen gegenüber den in gesteuerten Neuroprothesen üblichen zeitlich ausgelösten Transitionen wesentlich gesteigert. Gegenüber gesteuerten Systemen kann die Aktivierung der Kniestreckermuskulatur auf bis zu 55% gesenkt und dadurch die Ermüdung verringert werden. Dieses neue Regelungsverfahren benötigt keine genauere Kenntnis der Regelungsstrecke *a priori* und kann dadurch sehr schnell für verschiedene Patienten parametrisiert werden.

Literatur:

- [1] P.E. Crago, R.F. Kirsch, R.J. Triolo (1999) Movement Synthesis and Regulation in Neuroprosthesis (Ch. 42) in: J.M. Winters and P.E.Crago (eds.) Biomechanics and Neural Control of Posture and Movement. Springer, New York, 1999
- [2] Riener, R., Fuhr, T., Schmidt, G., Quintern, J. (1998) Entwurf von geregelten Neuroprothesen unter Berücksichtigung der intakten Willkürmotorik am Beispiel des Aufstehens. at-Automatisierungstechnik 46: 507-515.

