MATHEMATISCHES FORSCHUNGSINSTITUT OBERWOLFACH

Tagungsbericht 5/1990

Regelungstheorie

28.1. bis 3.2.1990

Die diesjährige Tagung über Regelungstheorie wurde wieder gemeinsam von H.W. Knobloch (Würzburg) und M. Thoma (Hannover) geleitet. Das starke Interesse von Wissenschaftlern aus dem Ausland wurde auch bei dieser Tagung deutlich; so kamen nahezu die Hälfte der 38 Teilnehmer aus dem Ausland – insbesondere konnten auch zwei Wissenschaftler direkt aus der Sowjetunion begrüßt werden.

Da für diese Tagung kein Schwerpunktthema festgelegt worden war, läßt sich aus den vorgestellten Beiträgen recht gut die Schwerpunktbildung der aktuellen Forschung auf dem Gebiet der Regelungstheorie ablesen. Natürlich soll im Rahmen dieses Berichts nun keine "Rangfolge" der einzelnen Themen angeführt werden; man kann aber durchaus feststellen, daß eine sehr große Zahl von Vorträgen dem Thema "Nichtlineare Systeme" gewidmet war. Dieses Thema war übrigens vor vier Jahren Schwerpunktthema auf der Tagung in Oberwolfach.

Auch innerhalb dieser "nichtlinearen" Themengruppe reichten die vorgestellten Beiträge von grundlegenden Arbeiten bis hin zu Anwendungen. Im einzelnen wurde beispielsweise dargelegt, welche topologischen Eigenschaften die Eingangs–Zustands–Abbildung aufweist oder – in einem anderen Beitrag – wie sich der Begriff der Steuerbarkeit mit den Methoden der differential-algebraischen Systembehandlung in sehr allgemeiner Form fassen läßt; es sind dabei auch implizite Differentialgleichungen oder solche mit zeitvariablen Koeffizienten als Systembeschreibungen zugelassen, und Erweiterungen auf Systeme mit verteilten Parametern, zeitdiskrete Systeme und Totzeitsysteme erscheinen möglich. Ein ebenfalls neues und leistungsfähiges Werkzeug für die Untersuchung nichtlinearer Systeme bildet die Theorie der invarianten Mannigfaltigkeiten. Der Beweis eines bisher nur vermuteten Stabilitätssatzes unter bestimmten Bedingungen eröffnet hier die Möglichkeit, durch geeignete Aufspaltung in Steuerungs- und Regelungsanteil den Einzugsbereich der Ruhelage sukzessive zu vergrößern, das System global zu stabilisieren, oder auch Systeme mit unpräzisen Messungen zu behandeln. Mehrere Vortragende beschäftigten sich mit der Stabilisierung nichtlinearer Systeme durch Ausgangsrückführung. Dabei lag der Akzent zum einen auf glatten Rückführungen, wobei topologische Techniken angewendet wurden, zum anderen wurden notwendige und hinreichende Bedingungen für die Lösbarkeit des Rückführproblems angegeben, wenn die Führungs- bzw. Störgröße durch ein externes dynamisches System erzeugt wird. Des weiteren wurde gezeigt, daß ähnlich der für lineare Systeme bekannten Bedingung bezüglich der Entkoppelbarkeit und Stabilisierbarkeit durch dynamische Rückführung auch für nichtlineare Systeme mit gleicher Anzahl von Ein- und Ausgängen eine entsprechende Bedingung herleitbar ist. Ein anderer Vortragender beschäftigte sich mit der Dekomposition von nichtlinearen Systemen in lineare und nichtlineare, durch Rückführung verbundene Teilsysteme. Die Optimierung nichtlinearer Systeme stand im Mittelpunkt einiger weiterer Vorträge. So beschäftigte sich ein Beitrag mit Extremaltrajektorien, die jedoch keine Optimaltrajektorien sind. Bedingungen dafür wurden mittels der Einbettung in eine Familie von Trajektorien und der Konstruktion einer Einhüllenden angegeben. Ein anderer Vortrag war der Herleitung eines Maximumprinzips für differentielle Einschließungen gewidmet. Aber auch die Anwendung auf einen komplexen Prozeß – eine Destillationskolonne – wurde vorgestellt. Hier wurde durch Vergleich mit aus Linearisierungen hergeleiteten Regelungsgesetzen und Simulationen der geregelten Anlage eindrucksvoll gezeigt, daß die Behandlung mittels Entwurfsverfahren für nichtlineare Systeme einen erheblichen Gewinn an Regelungsgenauigkeit zur Folge hat.

Der Entwurf von nichtlinearen Beobachtern mit Hilfe eines Computer-Algebra-Systems wurde in einem Beitrag demonstriert, der sich mit der Anwendung dieses Hilfsmittels für die nichtlineare Regelkreissynthese beschäftigte. Zwei weitere Vorträge waren in ähnlicher Weise der Nutzung von Software-Werkzeugen gewidmet. Dabei handelte es sich zum einen um die Anwendung von Methoden der Intervall-Mathematik zur hochgenauen Durchführung von numerisch schwierigen Entwürfen und zum anderen um die Vorstellung eines Interpreters, der aus der objekt-orientierten Beschreibung von Einzelkomponenten komplexe mechanische Systembeschreibungen erzeugt und durch symbolische Umformungen zur späteren numerischen Auswertung geeignet aufbereitet.

Mechanische Systeme bildeten auch den Ausgangspunkt einiger weiterer Beiträge. So beschäftigte sich ein Teilnehmer mit der Anwendung geometrischer Methoden für die Optimalsteuerung derartiger Systeme. Differential-algebraische Gleichungen, die zur Beschreibung von Systemen mit Kopplungs-Nebenbedingungen geeignet sind, wurden in zwei weiteren Vorträgen behandelt. Dabei ging es um die Parameterschätzung unter dem Einfluß von Rauschen (eine Instrumental-Variablen-Methode wird derzeit getestet) und um Fragen der Steuer- und Beobachtbarkeit derartiger singulärer dynamischer Systeme, wobei insbesondere auch die Rückkopplung von Ableitungen der Zustände oder Ausgänge untersucht wurde.

Weitere mechanische Systeme wurden in einem Beitrag über dissipative Systeme behandelt, bei dem ein H_∞-Entwurf für die robuste Regelung dieser Systeme vorgestellt wurde. Zwei weitere Vortragende beschäftigten sich mit H_∞-Methoden; einerseits wurden hinreichende Bedingungen für die H_∞-Optimierung entwickelt und ein Algorithmus für die Berechnung eines optimalen bzw. – da dieser nicht eindeutig ist – eines superoptimalen H_∞-Reglers vorgestellt, zum anderen wurde der Entwurf von H_∞-Reglern für die Stabilisierung und möglichst gute Störgrößenunterdrückung ohne Annahmen über die Lage der Nullstellen des Systems demonstriert.

Neben dem oben genannten Vortrag über dissipative Systeme beschäftigte sich noch ein weiterer Teilnehmer in seinem Beitrag mit verteilt-parametrischen Systemen; dabei wurde – neben der Herleitung von Regelungsgesetzen – der Begriff der relativen Ordnung eines Systems auf diese Systemklasse erweitert.

Die Regelung teilweise unbekannter Systeme ist ein wichtiges Gebiet für die Anwendungen; bei den bisher erwähnten Vorträgen wurden derartige Methoden bereits mehrfach behandelt. Weitere Beiträge zu diesem Gebiet kamen aus der Behandlung von Intervall-Matrizen, wobei die notwendige Zahl und Lage der zur Stabilitätsuntersuchung zu prüfenden Ecken bei zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Systemen hergeleitet wurde, und aus der Anwendung nichtlinearer Rückführungen, wobei eine Ausgangs-Synchronisierung unbekannter gekoppelter Systeme erreicht werden konnte. Ein weiterer Vortragender beschäftigte sich mit der Thematik der Regelung von Systemen mit ungewissen Parametern bei zusätzlichen Beschränkungen für die Stell- und Zustandsgrößen. Der Vortrag wurde durch einige Bilder von Rechnersimulationen ergänzt, die die Leistungsfähigkeit des verwendeten Ellipsoid-Kalküls anschaulich demonstrierten. Schließlich wurden neben diesen robusten Entwurfsverfahren auch adaptive Verfahren zusammenfassend vorgestellt. Eine vereinheitlichte Betrachtung mit der Möglichkeit der Abwägung zwischen Störunempfindlichkeit und schneller Adaption erlaubt die Beurteilung einer ganzen Reihe von in jüngster Zeit vorgeschlagenen adaptiven Algorithmen. Das Kalman-Filter erweist sich bei diesen Überlegungen als wesentliches Hilfsmittel. Mit dem Entwurf von Filtern reduzierter Ordnung beschäftigte sich ein weiterer Vortrag, der gleichermaßen Entwurfsverfahren im Zeitbereich und im Frequenzbereich vorstellte.

Eine weitere Arbeit beschäftigte sich im Themenbereich "Mehrgrößenregelungen" mit dem Entwurf von Systemen unter Berücksichtigung von Zustandsbeschränkungen, wobei das Entwurfsverfahren in lebendiger und konstruktiver Weise vorgestellt wurde. Ein anderer Vortragender zeigte auf, daß zwei Minimalrealisierungen, die gleiches Ein-/Ausgangsverhalten aufweisen, nicht notwendigerweise durch Ähnlichkeitstransformation aus-einander hervorgehen. In dem Fall, daß der Systemeingang durch Rückführung der Ausgangsgrößen gebildet wird, gilt dies jedoch nicht, was für die Untersuchung adaptiver Regelungen von hoher Bedeutung ist.

Gerade im Bereich selbstlernender und adaptiver Algorithmen sind zur Zeit erste Analysen zur Verwendung neuronale Netze im Gange. Eine Anwendung aus dem medizinischen Bereich führte eindringlich vor Augen, welche immensen Probleme es bereits im Vorfeld einer analytischen Behandlung zu lösen gilt, wenn man sich mit dem natürlichen "Vorbild" für diese Netzwerke beschäftigt, um beispielsweise Spastiken zu lösen oder Querschnittsgelähmten das Gehen zu ermöglichen. Es ist zu hoffen, daß die intensive Bearbeitung beider Verknüpfungen (der natürlichen und der künstlichen) zu einer interdisziplinären Förderung beider Arbeitsgebiete und damit zu tieferen Erkenntnissen führen wird!

Die hier vorgenommene knappe Zusammenfassung und Einordnung der Vorträge läßt erkennen, daß auch auf der diesjährigen Tagung wieder ein breites Spektrum aus dem Themengebiet vertreten war. Wie eingangs bereits bemerkt, zeigte sich aber, daß ein Schwerpunkt der derzeitigen Forschung auf dem Gebiet der Regelungstheorie im Bereich der nichtlinearen Systeme liegt. Dabei ist festzustellen, daß es bereits in einer Reihe von Teilaspekten gelungen ist, die aus der linearen Theorie bekannten leistungsfähigen Konzepte auch auf nichtlineare Systeme zu erweitern. Des weiteren ermöglichen moderne Verfahren der Rechner-Programmierung – z.B. Computer-Algebra-Systeme – zunehmend auch die Nutzung mathematisch aufwendiger Verfahren für den mit dem Regelungsentwurf befaßten Ingenieur, so daß durchaus die Möglichkeit einer baldigen Umsetzung leistungsfähiger Verfahren in praktische Anwendungen gegeben ist. Dies wiederum ist eine wesentliche Voraussetzung für den Dialog zwischen Mathematikern und Ingenieuren, denn damit ist gewährleistet, daß stets neue Fragestellungen aus der Praxis an die theoretisch arbeitenden Wissenschaftler herangetragen werden. Die vergangene Tagung in Oberwolfach hat – wie ihre Vorgänger – erneut zur Förderung und Vertiefung dieses Dialogs beigetragen.

Vortragsauszüge

A.A. AGRACHEV:

Topological Properties of Input-State Mappings

We investigate the local structure of the input-state mappings $F_t : u(\cdot) \rightarrow x(t)$ for a smooth control system $\dot{x} = f(x, u)$ with fixed initial condition $x(0) = x_0$. There are close connections of the extremality property of a trajectory $\tilde{x}(t)$ with some properties of the inverse images F_t^{-1} $(\tilde{x}(t))$. We study local homology groups of these inverse images using quadratic approximations of the mappings F_t and we consider some examples. Our research is initiated by the local part of the classical Morse theory but it turnes out that pictures are much more complicated than in classical variational problems even for relatively simple bilinear systems.

F. ALLGÖWER:

Nonlinear Distillation Control by Exact Input/Output Linearization – a Comparison to Linear Multivariable Controller Designs –

The dynamic behaviour of most chemical processes is governed by severely nonlinear differential equations. One way of designing controllers for such plants is to transform the nonlinear differential equations to linear ones by means of nonlinear change of coordinates and nonlinear feedback (exact linearization). For the resulting linear system a linear controller can be designed to guarantee stability and desired performance. Here the methodology of exact linearization is applied to the input–output behaviour of a staged distillation column for binary separation. Surprisingly good performance can be achieved using the nonlinear controller. This achieved performance of the nonlinearly controlled distillation column, as well as the effort needed to get the controller and the general applicability of the method are compared to controller designs based on linear process models (H_∞–optimal controller, LQG/LTR–controller and decoupled PI–controllers).

J. BIRK:

Symbolic Calculating Program System for Analysis and Design of Nonlinear Systems

Recently developed methods for the analysis and design of nonlinear continuous dynamical systems of the form $\dot{x} = f(x,u)$, $y = h(x,u)$ require extensive analytical calculations which are not practicable without computer assistance. With the aid of the symbolic programming language MACSYMA, a program system was developed that enables the user to analyse the nonlinear system equations with respect to controllability, observability, and canonical forms or to design nonlinear state feedback and state estimators. For each analysis and design problem, several methods known from literature are realized. In addition to these calculating functions, the program system contains user interface and input/output functions, e.g. to enable simulation studies by means of an external simulation software. The MACSYMA–program is also a basis for an expert system in nonlinear control theory, where the corresponding rules for applying analytic methods will be integrated in future.
In the presentation, the application of the program system is explained for the nonlinear observer design. Concerning this, various known methods for nonlinear state estimator design are summarized with regard to the assumptions for their application and with respect to the required mathematical basic functions. The structure of the program system corresponds to the mathematical hierarchy of the single analysis and design steps. Moreover, the handling of the program system is demonstrated.

V. BLAGODATSKIKH:

Optimal Control Problems for Differential Inclusions

The optimal control problem is considered for objects which behaviour is described by the differential inclusion $\dot{x} \in F(x)$. The notion of the variation of a given solution $x(t)$ is introduced and using these variations a necessary optimality condition in the form of Pontryagin maximum principle is proved. Then sufficient conditions for optimality are obtained also in the form of the maximum principle. These sufficient conditions can be applied for optimal control problems with state constraints. In this case the adjoint function $\psi(t)$ can have jumps. Some examples are given.

A. BUNSE-GERSTNER:

Derivative Feedback for Descriptor Systems

For linear time-invariant singular systems it is customary to use proportional state or output feedback control in order to achieve a desired closed loop behaviour. Derivative feedback is rarely considered. Here we examine how derivative feedback in descriptor systems can be used to alter the structure of the system pencil under various controllability and observability conditions. It is shown that for a system which is controllable and observable at infinity derivative output feedback controls can be constructed such that the closed loop system is regular and has an index of at most one. This property ensures the solvability of the resulting system of dynamic-algebraic equations. For systems which are completely controllable and observable derivative output feedback controls can be constructed which transform the system into a controllable and observable standard system.

R.F. CURTAIN:

Robust Control of Dissipative Colocated Systems

Many multi-body configurations including both rigid and flexible components are well modelled as Hamiltonian systems which are in general nonlinear. For certain control tasks one designs a controller based on a linearized system. Linearizations of Hamiltonian systems have the nice property that the system operator is skew adjoint, $A + A^* = 0$, and all its eigenvalues lie on the imaginary axis. If we control using colocated actuators and sensors, $C = B^*$, then we obtain a lossless system $G(s) = B^*(sI - A)^{-1}B$. We present new results on robust controller design for such systems including the case where the state space is infinite-dimensional.

N. DOURDOUMAS:

Synthese von Mehrfachregelkreisen

Energiebeschränkungen innerer Systemgrößen stellen bei der Reglersynthese eine wichtige Klasse zu berücksichtigender Beschränkungen dar. Sie können mathematisch mit Hilfe der L_2–Norm beschrieben werden. Das hier vorgestellte Verfahren ermöglicht es, den Regler für ein Mehrgrößensystem so zu entwerfen, daß die L_2–Norm einer inneren Größe beschränkt bleibt und gleichzeitig – als Gütefunktional für die Folgeregelung – die L_2–Norm der Regeldifferenz minimal wird. Voraussetzung hierfür ist, daß die Eingangsgrößen gewissen verallgemeinerten Energiebeschränkungen genügen.
Zur Reglersynthese wird die Parametrisierung aller für eine gegebene Strecke realisierbaren asymptotisch stabilen Matrix-Übertragungsfunktionen des geschlossenen Regelkreises angewandt. Sie ermöglicht es, den Entwurf mit Termen des geschlossenen Kreises direkt durchzuführen. Hilfreich hierfür ist die Einführung einer Norm, die die maximale L_2–Norm der Ausgangsgröße eines linearen zeitinvarianten Übertragungssystems unter Berücksichtigung der Energiebeschränkungen der Eingangsgröße als Eigenschaft seiner Matrix-Übertragungsfunktion beschreibt. Die Berechnung dieser Norm führt im Frequenzbereich auf ein infinites Optimierungsproblem, das durch Dualisierung auf ein nichtlineares semi-infinites Problem reduziert wird. Es wird gezeigt, wie dieses nichtlineare semi-infinite Problem numerisch gelöst werden kann. Die eigentliche Reglerentwurfsaufgabe kann dann mit den o.g. Hilfsmitteln als Minimum–Norm–Problem neu formuliert und gelöst werden.

M. FLIESS:

Controllability Revisited

Kalman's controllability is extended to nonlinear dynamics via elementary differential field techniques. This generalization, which was first suggested by J.F. Pommaret, is related to the notion of strong accessibility introduced by H.J. Sussmann and V. Jurdjevic in 1972. In the case of constant or time–varying linear systems, it comes down to a purely module–theoretic description. As a bonus of our methods we give a straightforward characterization of hidden modes and we also demonstrate that the controllability of nonlinear dynamics is equivalent to the controllability of its tangent linearized dynamics.

D. FRANKE:

Model Matching for a Class of Distributed Parameter Control Systems

The method of representing linear systems by algebraic relations between generalized Fourier coefficients (D. Franke, Oberwolfach 1988) is extended to linear distributed parameter systems. In the special case of colocated actuators and sensors the relative order turns out to be small in spite of the infinite dimension of the system. This allows the design of feedback control laws by balancing a few Fourier coefficients in the closed loop. The error minimizing property of Galerkin's method guarantees best possible matching of a simple MIMO transfer model including non-interaction. Numerical results are presented for the active damping of the beam equation.

P. HIPPE:

Der Entwurf reduzierter Kalman-Filter im Frequenzbereich

Wenn ein Teil der Ausgangsgrößen eines Systems nicht gestört ist, reduziert sich die Ordnung des Kalman-Filters um die Anzahl der nicht verrauschten Meßgrößen. Für den Entwurf solcher Filter liegt seit langem eine Fülle von Zeitbereichsansätzen vor, während eine Lösung auf der Basis von Übertragungsmatrizen zunächst nur für das Filter voller Ordnung formuliert werden konnte. In jüngster Zeit erschienen erste Ansätze für das vollständig reduzierte Filter, d.h. für den Fall, daß alle Meßgrößen unverrauscht sind. Hier wird eine Lösung für den allgemeinen Fall entwickelt, die die bekannten Ansätze als Sonderfälle enthält.

A. ISIDORI:

Output Regulation of Nonlinear Systems

The problem of having the output of a fixed plant to track (or to reject) a family of given reference (or disturbance) signals is a problem of longstanding interest in control theory. Its solutions for linear single-output plants dates back to the dawn of control and servomechanisms theory. The complete solution for multi-output systems was achieved in the 70s, as a result of the work of Wonham, Davison and Iramis. We consider here the same problem for a plant modeled by a nonlinear differential equation. More precisely, we consider $\dot{x} = f(x, w, u)$; $\dot{w} = s(w)$; $e = h(x, w)$, where x denotes the state of the plant, u its inputs, w the signal which models reference and/or disturbances, and e the output error, the difference between actual and desired plant output. The control task is to design a feedback, namely $u = \theta(z)$; $\dot{z} = \eta(z, e)$ in order to achieve, for the closed loop, exponential stability and output regulation. The latter means that $\lim_{t \to \infty} e(t) = 0$ for each initial condition x(0), w(0), z(0) in the neighborhood of 0,0,0.
Under the assumption that the plant is stabilizable and detectable and that the exosystem is "neutrally stable" (a property that can be characterized by saying that the Ω limit set of s(w) is dense in a neighborhood of 0) it is shown that a solution to the problem exists if and only if the following pair of equations

$$\frac{\partial \pi}{\partial w} s(w) = f(\pi(w), w, e(w))$$

$$0 = h(\pi(w), w)$$

is solvable for π(w), e(w). Solution is obtained as a simple application of center manifold theory, and – in the case of linear systems – incorporates in a very natural manner all earlier results.

H.W. KNOBLOCH:

Invariant Manifolds: A New Tool in Control Theory?

Modern geometric theory of ode's studies invariant manifolds (stable/unstable manifold, center manifold) which owe their existence to the dynamical principle of dichotomy. It can be best understood as guiding idea for the analysis of singularly perturbed coupled pairs of ode's:

$$\epsilon \dot{x} = g(x, y), \quad \dot{y} = h(x, y), \quad \epsilon \text{ a small parameter.}$$

If $\partial g/\partial x$ is a stable matrix at every zero of y, then – for sufficiently small $\epsilon > 0$ – the eigenvalues of the matrices

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial g}{\partial x} \quad \text{and} \quad \frac{\partial h}{\partial y}$$

– evaluated at the zeros of g – can be separated by a vertical line in the complex plane: This is the precise meaning of dichotomy. The lecture touches upon two applications of this new view of singular perturbation theory. 1. Global stabilization of an affine control system

$$\dot{x} = f(x) + Bu, \quad B \text{ constant}$$

and the hypothesis that the pairs of matrices $(f_x(x), B)$ are controllable for each x. 2. Concrete solution of the inverse problem of control theory: Determine the input u of a system $\dot{x} = f(x, u)$ from measured values of some output $y = c(x)$ provided that the input/output map is formally invertible.

A. KURZHANSKI:

Ellipsoidal Calculus for Dynamics and Control

A system of basic evolution equations for the problem of control synthesis is described. Each of these is related to one of the problems of synthesizing a multivalued control strategy for a linear system with uncertain (unknown but bounded) input under geometric constraints on the controls and the state space variables. Each of these equations allows multivalued solutions represented by certain types of multivalued integrals. The solutions to the evolution equations are then approximated by varieties of ellipsoidal valued multi-functions the intersection of whose graphs gives the precise solution. An ellipsoidal calculus is then described with the aim of exactly representing the sums, Minkowski differences and intersections of ellipsoids through their intersections and unions of ellipsoidal-valued transformations. Simulation results for some of these problems for 2- and 4-dimensional linear control systems were then presented.

H. KWAKERNAAK:

Further Progress in the Polynomial Solution of the Standard H_∞ Optimal Control Problem

Recent process in the polynomial solution of the standard H_∞ optimal control problem includes:

1. Reduction of the problem to a line search, where at each step of the search two polynomial J–spectral factorizations are required. Exact optimal solutions may be found.
2. Determination of "super optimal" solutions for the standard problem.

L. LJUNG:

Adaptation Mechanisms in Adaptive Algorithms

Adaptive algorithms for estimation and tracking are used in a wide range of applications. Most algorithms are designed on an ad hoc basis, but anyway any adaptation mechanism will correspond to assumptions – explicit or implicit – about the time variation of the system to be tracked. We show here how the Kalman filter can be taken as a common basis for a wide family of approaches. It now becomes clear what assumption – implicitly – lies behind the most commonly used algorithms – recursive least squares and least mean squares. Each of them assume that the parameter variation is a random walk with different, time varying covariance matrices. We also show what are the basic underlying principles for the analysis of adaptive algorithms. In particular, a new result on frequency domain interpretations of the covariance of estimated dynamic systems is demonstrated.

J. LÜCKEL:

Entwurfswerkzeuge für mechatronische Systeme

Mechatronische Systeme, aufgebaut aus mechanischen Systemen, ergänzt um elektrische oder hydraulische Aktoren und aufwendige Regelelemente zur Verbesserung der statischen und dynamischen Eigenschaften, werden immer komplexer. Beim Einsatz u.a. in der Fahrzeug- und Fertigungstechnik ist eine umfangreiche theoretische Vorarbeit von entscheidender Bedeutung. Dazu werden Entwurfswerkzeuge benötigt, die es gestatten, mit umfangreicher grafischer Unterstützung den gesamten Entwicklungskreislauf von der Modellbildung (physikalisch und mathematisch) über eine Analyse und Synthese bis hin zur Realisierung und Durchführung von Testläufen zu unterstützen. Dabei ist es notwendig, die drei Bereiche Ingenieurtechnik (Formulierung des Problems, Bildung und Ableitung der beschreibenden Modelle, Festlegung der Entwurfsziele ...), Regelungstechnik (Vorgabe von Regler-/bzw. Kompensatorstrukturen, Festlegung von Regelzielen, Durchführung der Parameteroptimierung ...) und Informatik (Anwendung moderner Software-Engineering-Konzepte, Definition von Klassen und Objekten, Festlegung von Systemrepräsentationen und Datenmodellen, Implementierung der Algorithmen und Berechnungsabläufe in einer hierarchisch gegliederten, modularisierten Programmtechnik) möglichst gleichgewichtig einzusetzen. Die Probleme werden an einem Beispiel aus der Fahrzeugtechnik erläutert.

G. LUDYK:

Enclosure Methods and Their Application in Control Theory

Enclosure methods for the solution of linear and nonlinear systems of equations are described. These methods give highly accurate solutions in the form of intervals using the methods of interval mathematics with the optimal scalar product implemented in PASCAL-SC, where it is guaranteed that the solutions lie within the calculated very narrow intervals. It is described, how the problems of control theory must be formulated in order to be solvable using the new method. Besides the pole placement problem treated in detail, the eigenvalue problem, the singular value decomposition and the simulation of nonlinear discrete-time systems are discussed.

M. MANSOUR:

Robust Stability of Interval Matrices

A survey of the sufficient conditions for the stability of interval matrices with some new results and simplified proofs is given. The methods used to obtain sufficient conditions of the interval matrix

$A_I = [B;C] \quad A \in A_I, \; b_{ij} \leq a_{ij} \leq c_{ij}$ to be stable are

i) Gershgorin & Bauer-Fike theorems,
ii) norm characteristics (convergence of the norm),
iii) convergence properties,
iv) Lyapunov equations,
v) frequency domain method based on the root exclusion lemma,
vi) Kronecker sums and products (stability problem reduced to a nonsingularity problem).

Necessary and sufficient conditions are obtained for a 2x2 matrix where the check of the stability of 12 corners (of the box in the element space) is required. For nxn matrices an algorithmic approach based on the pseudo division algorithm is given which solves the problem completely. The stability problem is reduced to the problem of solving nonlinear algebraic equations. The pseudo division algorithm is used with formula manipulation language like "MACSYMA". However, the computations become much involved as the number of parameters increases.

P.C. MÜLLER:

Remarks on Parameter Estimation of Linear Differential Algebraic Control Systems

Mechanical systems with holonomic and/or nonholonomic constraints are governed by a set of differential-algebraic equations of index 3, i.e. they belong to the class of descriptor (or singular) systems. Although well-known methods of analytical mechanics exist to eliminate the constraints resulting in a regular set of differential equations, there are reasons to manipulate the original descriptor system. One reason is the better physical transparency of the system description and its interpretation by subsystems, particularly with respect to the design of decentralized feedback control. For the system analysis and simulation the knowledge of the system parameters is required. Until now, the author does not know established methods of parameter estimation of descriptor systems. Therefore, certain basic ideas are represented to estimate physical parameters of linear time–invariant time–continuous mechanical systems in descriptor form. Fundamental requirements on sensor configurations are discussed to enable the estimation of physical parameters. It is shown how the classical linear model of parameter estimation of regular dynamical systems has to be changed in a different linear estimation model in the case of descriptor systems. This extension of the algorithms includes additional problems of linear algebra.

H. NIJMEIJER:

<u>Factorization of Nonlinear Systems</u>

In this talk we present some partial results on the question under which condition a nonlinear system $\dot{x} = f(x,u)$ can be decomposed as a lower dimensional nonlinear system $\dot{\bar{x}} = \bar{f}(\bar{x},v)$ together with a dynamic precompensator $\dot{z} = \phi(z,\bar{x},v)$ and a linking map $u = \psi(z,\bar{x},v)$. For single input systems a sufficient condition for a local factorization of the system is given. Necessary and sufficient conditions for the factorization of a nonlinear system into a controllable linear system with a nonlinear dynamic precompensator are given.

J.W. POLDERMAN:

<u>On the Relation Between Two Realizations of One Input/Output Sequence</u>

Let there be given a sequence $\{(u(k),\ y(k)\}_{k\in \mathbb{Z}}$, $u(k) \in \mathbb{R}^m$, $y(k) \in \mathbb{R}^p$.

Suppose that there exist two minimal realizations of order n of this sequence, i.e.:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \qquad y(k+1) = Fz(k) + Gu(k)$$

$$y(k) = Cx(k) \qquad y(k) = Hz(k) .$$

The problem that we address is the relation between the two realizations. For the case m = p = 1 we have the following result:

<u>Theorem</u>: If there exists $L \in R^{1\times n}$ such that for all $k \in \mathbb{Z}$, $u(k) = Lx(k)$, then there exists $S \in Gl(n)$ such that for all $k \in \mathbb{Z}$: $x(k) = Sz(k)$.
Extensions, conjectures and counterexamples to some of the conjectures will be discussed.

C. SCHERER:

H_∞-Control Without Assumptions on Finite or Infinite Zeros

We consider a system which is described by

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gd, \qquad x(0) = 0$$

$$y = C_y x + D_y d,$$

$$z = C_z x + D_z u$$

such that (A, B) is stabilizable and (C_y, A) is detectable. In addition to internally stabilizing the system, we want to reduce the influence of the unknown disturbance d on the output z as far as possible. More precisely, any internally stabilizing compensator $\dot{w} = Nw + My$, $u = Fw + Ly$ $(w(0) = 0)$ gives rise to a closed-loop system

$$\dot{x}_e = \mathcal{A}x_e + \mathcal{G}d, \qquad x_e(0) = 0,$$

$$z = \mathcal{C}x_e + \mathcal{D}d$$

that defines a linear map $L^2[0, \infty) \ni d \to z \in L^2\,[0, \infty)$. The H_∞-optimization problem consists of minimizing the (induced) norm of this map (which is just the H_∞-norm of the closed-loop transfer matrix $\mathcal{C}(s\mathcal{I} - \mathcal{A})^{-1}\,\mathcal{G}$) over all internally stabilizing controllers. In this talk we show how to check whether some parameter $\gamma > 0$ is suboptimal in the sense that there exists a stabilizing compensator such that the closed-loop norm $\|\,\mathcal{C}(s\mathcal{I} - \mathcal{A})^{-1}\,\mathcal{G}\,\|_\infty$ is strictly less than γ. This is done without any additional assumptions on the system. In particular, neither the finite zero structure of the system on the imaginary axis nor its infinite zero structure is restricted.

S. SCHMID:

Adaptive Synchronization of Interconnected Linear Systems

We extend the concept of universal adaptive controllers (Morse, Nussbaum, Willems, Byrnes) from stabilization of single systems to synchronization of interconnected systems. We consider interconnections of scalar linear systems (A_i, b_i, c_i), i = 1, ..., N, which we only known to be of minimal phase and relative degree one:

$$\dot{x}_i = A_i x_i + b_i\,(v_i + \sum_j f_{ij}\,y_j)$$

$$y_i = c_i\,x_i \qquad\qquad i = 1, \ldots N.$$

The system parameters, the dimensions of the systems, and the coupling matrix (f_{ij}) are assumed to be unknown. N reference signals $y_{ref,i}(\bullet)$ are given, as solutions of linear differential equations. Using functions of the Nussbaum type with special properties, local nonlinear feedback controllers are presented which synchronize the system dynamics: the error functions $e_i = y_i - y_{ref,i}$ tend to zero asymptotically. No explicit identification of system parameters is applied.

L. SCHUMANN:

Geometric Optimal Control

Conservative mechanical systems possess two equivalent representations, the Lagrangian expressed by a set of n second order ordinary differential equations and the Hamiltonian with a set of 2n first order ordinary differential equations. The connection in between is given by the bijective Legendre morphism. The approach of homogenous variational calculations, where the time is not treated as a special variable leads naturally to the Finsler fundamental tensor and consequently to Finsler geometry. In optimal control theory the Legendre morphism can be viewed as mute, since the Lagrangian type representation has Hamiltonian structure. Corresponding to this event, the Finsler fundamental tensor does not have full rank. Whence we will give a Hamiltonian based construction of homogeneous optimal control. Finally we are able to state a generalized action principle.

E.D. SONTAG:

Smooth Feedback Stabilization

We present an introductory talk surveying current approaches to the feedback stabilization problem for nonlinear control systems. Lyapunov techniques, degree arguments, and first-order methods are described. Decomposition results are applied to obtain stabilizing laws for examples including momentum control.

H.J. SUSSMANN:

Envelopes in Control Theory

The theory of envelopes is a powerful tool that makes it possible to prove, for certain problems in the classical Calculus of Variations, that certain extremals are not optimal. It turns out that the theory of envelopes can be generalized to optimal control problems. This generalization can be used to prove nonoptimality of certain Pontryagin extremals. As an example, we use the envelope technique to prove the following results, already obtained by Schaettler, Agrachev and Gamkrelidze by other methods: if f and g are C^∞ vector fields on $\Omega \subseteq \mathbb{R}^3$, Ω open, and $\bar{p} \in \Omega$ is such that the triplex $(g(\bar{p}),\ [f,g](\bar{p}),\ [f-g,\ [f,g]](\bar{p}))$ and $(g(\bar{p}),\ [f,g](\bar{p}), [f+g,\ [f,g]](\bar{p}))$ are linearly independent, then there exists a neighborhood U of $\bar{p}$ and a T>0 such that, if γ: $[0,\tau] \to U$ is a time-optimal trajectory of the system $\dot{x} = f(x) + ug(x), |u| \leq 1$, such that $\tau \leq T$ and γ is bang-bang, then γ has at most two switchings.

G. VOSSIUS:

Therapie der Spastik mittels Elektrostimulation – Umprogrammierung eines sich falsch organisierenden Neuronenpools

Der Einsatz der Elektrostimulation zur Behandlung von Lähmungen kann in drei Bereiche eingeteilt werden:

- Die Erhaltung des physiologischen Status einschließlich Training der Muskulatur.
- Die Minderung oder Beseitigung von Defekten wie Wirbelsäulenverkrümmungen, Spastik, Kontrakturen oder Anfälligkeit für Druckgeschwüre.
- Die funktionelle Elektrostimulation, FES, die dem Behinderten über die Reizung peripherer motorischer Nerven Bewegungsfunktionen in eingeschränktem Maße wiedergeben kann.

Bei Paraplegikern (Lähmung der unteren Extremitäten) ist zur Herstellung einer ausreichenden Steuerbarkeit die Stabilisierung von Fuß-, Knie-, Hüftgelenken und ggf. der Lendenregion erforderlich. Hierdurch kann ein Stehen in normaler Gelenkstellung mit der Körperachse über den Füßen (unter Hilfe von Stöcken) erreicht werden. Dadurch wird die Voraussetzung für die Regelung von Stehen und Gehen geschaffen sowie eine Überlastung der Gelenke und des Schultergürtels mit den Armen als willkürlichem Stabilisator erreicht.
Schwere sonst der Therapie kaum zugängliche Spastiken, die im Gefolge von unterschiedlichen Erkrankungen oder Verletzungen des Nervensystems auftreten, können oftmals mittels Elektrostimulation günstig beeinflußt werden bzw. entscheidend gemindert. Dadurch werden einmal die Folgen der Spastik selbst beseitigt und zum anderen wird eine Weiterführung des normalen Rehabilitationsverfahrens ermöglicht. Im Prinzip geschieht dies vermutlich durch eine Umprogrammierung des neuronalen Netzwerkes im Rückenmark mittels der applizierten Stimulationsmuster. Die neurophysiologischen Grundlagen und daraus resultierende theoretische Ansätze zur Analyse des Interneuronennetzwerks werden diskutiert. (Der Vortrag wurde durch Videodemonstrationen der praktischen Anwendung in beiden Gebieten ergänzt.)

K.G. WAGNER:

<u>Entkopplung mit Stabilität bei nichtlinearen Kontrollsystemen</u>

Wann läßt sich zu einem gegebenen nichtlinearen Kontrollsystem eine Zustandsrückführung finden, die zwei Ziele zugleich erreicht?

a) Entkopplung der Eingangs-/Ausgangs-Kanäle ("noninteracting control") und b) Stabilisierung einer vorhandenen Ruhelage des ungesteuerten Systems? A-priori-Annahme dabei ist, daß jedes dieser Ziele für sich allein verwirklicht werden kann. Wir untersuchen speziell die Möglichkeiten von Rückführungen, die eine dynamische Zustandserweiterung einschließen. Es stellt sich heraus, daß die entkoppelnden Rückführungen im resultierenden ungesteuerten System ein Teilsystem (S) induzieren, das vom gegebenen System allein von Anfang an festgelegt ist und nicht von der Wahl der Rückführung abhängt. Die Stabilität von (S) ist eine neue notwendige Bedingung für die Lösbarkeit des Problems. Sie steht in engem Zusammenhang mit einer ganz analogen Bedingung von Isidori (vgl. Tagung Regelungstheorie in Oberwolfach im März 1988) und Grizzle für den Fall, daß Zustandserweiterung nicht erlaubt ist: ein größeres, (S) umfassendes Teilsystem (S') spielt dort die Rolle von (S). Beispiele zeigen, daß eine Rückführung mit Zustandserweiterung auch dann Erfolg haben mag, wenn nur (S), nicht (S') stabil ist.

Berichterstatter: A. Munack

Tagungsteilnehmer

Prof. Dr. A. A. Agrachev
Steklov Mathematical Institute
Academy of Sciences of the USSR
42, Vavilova str.

Moscow 117 966 GSP-1
USSR

Prof. Dr. R. F. Curtain
Mathematisch Instituut
Rijksuniversiteit te Groningen
Postbus 800

NL-9700 AV Groningen

F. Allgöwer
Institut für Systemdynamik und
Regelungstechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9

7000 Stuttgart 80

Prof. Dr. N. Dourdoumas
Theorie der Automatisierungssysteme
Fachbereich 14
Gesamthochschule Paderborn
Postfach 1621

4790 Paderborn

J. Birk
Institut für Systemdynamik und
Regelungstechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9

7000 Stuttgart 80

Prof. Dr. M. Fliess
Laboratoire des Signaux & Sytemes
Ecole Superieure d'Electricite
CNRS
Plateau du Moulon

F-91190 Gif-sur-Yvette

Prof. Dr. V. J. Blagodatskih
Steklov Mathematical Institute
Academy of Sciences of the USSR
42, Vavilova str.

Moscow 117 966 GSP-1
USSR

Prof. Dr. D. Franke
Fachbereich Elektrotechnik
- Regelungstechnik -
Universität der Bundeswehr
Holstenhofweg 85

2000 Hamburg 70

Dr. A. Bunse-Gerstner
Fakultät für Mathematik
der Universität Bielefeld
Postfach 8640

4800 Bielefeld 1

Prof. Dr. E. D. Gilles
Institut für Systemdynamik und
Regelungstechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9

7000 Stuttgart 80

Gefördert durch
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Dr. P. Hippe
Institut für Regelungstechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstr. 7

8520 Erlangen

Prof. Dr. A. Isidori
Dipartimento di Informatica
Universita di Roma
Via Eudossiana 18

I-00184 Roma

Prof. Dr. H.W. Knobloch
Mathematisches Institut
der Universität Würzburg
Am Hubland

8700 Würzburg

Prof. Dr. M. Köhne
Meß- und Regelungstechnik
Fachbereich Maschinentechnik
Universität Gesamthochschule Siegen
Postfach 10 12 40

5900 Siegen

Prof. Dr. G. Kreisselmeier
Regelungs- und Systemtheorie
Fachbereich 16 Elektrotechnik
Gesamthochschule Kassel
Postfach 101 380

3500 Kassel

Prof. Dr. A. B. Kurzhanski
IIASA International Institute for
Applied Systems Analysis
Schlossplatz 1

A-2361 Laxenburg

Prof. Dr. H. Kwakernaak
Department of Applied Mathematics
Twente University
P.O.Box 217

NL-7500 AE Enschede

Prof. Dr. L. Ljung
Dept. of Electrical Engineering
Division of Automatic Control
Linköping University

S-581 83 Linköping

Prof. Dr. J. Lückel
FB 10 Maschinentechnik
Gesamthochschule Paderborn
Pohlweg 55

4790 Paderborn

Prof. Dr. G. Ludyk
Institut für
Automatisierungstechnik
Universität Bremen
Postfach 330 440

2800 Bremen 33

Prof. Dr. M. Mansour
Institut für Automatik
ETH-Zentrum

CH-8092 Zürich

Prof. Dr. H. A. Nour-Eldin
Automatisierungstechnik, Regelungs-
technik, Technische Kybernetik
Gesamthochschule Wuppertal
Fuhlrottstr. 10

5600 Wuppertal 1

Prof. Dr. P. C. Müller
Sicherheitstechnische Regelungs-
und Meßtechnik
Bergische Universität/GH Wuppertal
Gaußstr. 20

5600 Wuppertal 1

A. Nützel
Institut für Biokybernetik und
Biomedizinische Technik
Universität Karlsruhe
Kaiserstraße 12

7500 Karlsruhe 1

Prof. Dr. A. Munack
Institut für Biosystemtechnik
Bundesforschungsanstalt für
Landwirtschaft
Bundesallee 50

3300 Braunschweig

Dr. J. W. Polderman
Department of Applied Mathematics
Twente University
P.O.Box 217

NL-7500 AE Enschede

J. Neuhaus
Kochstr. 18

4100 Duisburg 12

C. Scherer
Mathematisches Institut
der Universität Würzburg
Am Hubland

8700 Würzburg

Dr. H. Nijmeijer
Department of Applied Mathematics
Twente University
P.O.Box 217

NL-7500 AE Enschede

S. Schmid
Fachbereich Mathematik
der Universität Kaiserslautern
Erwin-Schrödinger-Straße
Postfach 3049

6750 Kaiserslautern

Prof. Dr. L. Schumann
Meß-/Regelungstechnik
ML K 39
ETH-Zentrum

CH-8092 Zürich

Prof. Dr. M. Thoma
Institut für Regelungstechnik
Universität Hannover
Appelstr. 11

3000 Hannover 1

Prof. Dr. H. Schwarz
Fachbereich 7 Maschinenbau
Meß- Steuer- und Regelungstechnik
Universität Duisburg
Postfach 101629

4100 Duisburg 1

Prof. Dr. I. Troch
Inst. f. Analysis, Technische
Mathematik u. Versicherungsmathem.
Technische Universität Wien
Wiedner Hauptstr. 8 - 10

A-1040 Wien

Prof. Dr. E. D. Sontag
Dept. of Mathematics
Rutgers University
Busch Campus, Hill Center

New Brunswick , NJ 08903
USA

Prof. Dr. G. Vossius
Institut für Biokybernetik und
Biomedizinische Technik
Universität Karlsruhe
Kaiserstraße 12

7500 Karlsruhe 1

Dr. R. Steinhauser
Institut für Dynamik der
Flugsysteme
DFVLR

8031 Weßling

Dr. K. G. Wagner
Fakultät für Mathematik
Universität Würzburg
Am Hubland

8700 Würzburg

Prof. Dr. H. J. Sussmann
Dept. of Mathematics
Rutgers University
Busch Campus, Hill Center

New Brunswick , NJ 08903
USA