MATHEMATISCHES FORSCHUNGSINSTITUT OBERWOLFACH

T a g u n g s b e r i c h t 11 / 1984

Regelungstheorie

4. bis 10. 3. 1984

Auch die diesjährige Tagung über Regelungstheorie wurde - wie in den vergangenen Jahren - wieder gemeinsam von H. W. Knobloch (Würzburg) und M. Thoma (Hannover) geleitet.

Eine große Anzahl von Wissenschaftlern hatte die Einladung zur Teilnahme an der Tagung angenommen und war nach Oberwolfach gekommen. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die Zahl der Gäste aus dem Ausland, die mit 21 Teilnehmern die Hälfte der insgesamt 43 Tagungsteilnehmer stellten. Dabei sind neben zwei Gästen aus den USA und den wie auch bei den vorausgegangenen Tagungen stärker vertretenen Gruppen aus den Niederlanden und Österreich diesmal insbesondere vier Wissenschaftler aus Polen und einer aus der Tschechoslowakei zu nennen, die erfreulicherweise der Einladung folgen konnten. Weitere Teilnehmer kamen aus Belgien, Frankreich, Italien und der Schweiz.

Nachdem die bei der Tagung 1980 erstmals eingeführten Übersichtsvorträge von der überwiegenden Mehrheit der Teilnehmer äußerst positiv beurteilt worden waren, wurde auch diesmal einer der beiden Schwerpunkte der Tagung, nämlich die Behandlung komplexer dynamischer Systeme, von einem Referenten (D.D. Siljak) in zwei Übersichtsvorträgen dargestellt. Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Theorie der nichtlinearen Systeme. Beide Themen wurden von einer Reihe von Vortragenden aufgegriffen; dies verdeutlicht die hohe wissenschaftliche Aktualität der gesetzten Schwerpunkte.

Die relativ hohe Teilnehmerzahl in Verbindung mit einer großen Zahl angemeldeter Vorträge führte zu einem dichtgedrängten Vortragsprogramm, das nur durch Ausnutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Tagungszeit und durch Disziplin der Referenten beim Einhalten der Vortragszeit bewältigt werden konnte.

Dem Charakter der Tagung entsprechend überwogen die theoretischen Vorträge. Dennoch lagen auch einer Reihe von Beiträgen konkrete Anwendungen zugrunde; beispielsweise wurde die optimale Regelung eines aufgebauten Eisenbahn-Laborversuchs mittels Prozeßrechner anhand eines Films demonstriert.

Methoden zum Entwurf von Regelungen für Mehrgrößensysteme im zeitkontinuierlichen und im zeitdiskreten Fall wurden in einer Reihe von Vorträgen unter unterschiedlichen Gesichtspunkten behandelt. So wurden auch im Rahmen des einen Themenschwerpunktes spezielle Verfahren zum Entwurf von Modellen und Regelungen für komplexe Systeme sowie die Behandlung von zwei- und dreidimensionalen Systemen vorgestellt.

Die traditionellen Gebiete der Optimierung und der Stabilitätstheorie sowie die Bereiche Systemidentifikation und adaptive Regelung waren ebenfalls unter den Themen vertreten.

Eine Reihe von Vorträgen galt dem Thema "unendlich-dimensionale Systeme", wobei neben den Problemen der Erweiterung der geometrischen Methoden auf diese Systemklasse auch neuere Ergebnisse bei der Ermittlung unbekannter Systemparameter sowie Regelungsprobleme für Totzeitsysteme und zeitvariable Systeme diskutiert wurden.

Nichtlineare Systeme nahmen im Programm einen großen Raum ein. Dabei wurden unterschiedliche Methoden des Entwurfs von Regelungen, der Existenz und Konstruktion von Realisierungen und kanonischen Formen sowie der nichtlinearen Filterung vorgestellt.

Nähere Angaben zu den gehaltenen Vorträgen sind den nachfolgenden Vortragsauszügen zu entnehmen.

Die auf dieser Tagung gebotene Kombination von ingenieurwissenschaftlichen und mathematischen Vorträgen ist wohl charakteristisch für die in Oberwolfach abgehaltenen Tagungen über Regelungstheorie. Durch Vorträge und Diskussionen konnten auch diesmal über den Austausch fachspezifischer Gedanken hinaus die Ingenieure neue Anregungen zur Lösung ihrer Probleme gewinnen, während die Mathematiker von der Darstellung technisch relevanter Problemstellungen profitieren konnten.

Der auf der diesjährigen Tagung gesetzte Schwerpunkt "nichtlineare Systeme" erschien den meisten Teilnehmern als äußerst aktuell und für weitere wissenschaftliche Untersuchungen sowohl von der theoretischen als auch von der anwendungsbezogenen Seite her besonders attraktiv. Insbesondere die zur Zeit in Entwicklung befindliche Erweiterung von Methoden des "geometric approach" auf gewisse Klassen nichtlinearer Systeme soll daher einen Schwerpunkt auf der nächsten Tagung über Regelungstheorie bilden. Dieser Vorschlag fand breite Zustimmung unter den Teilnehmern. Allgemein wurde besonders hervorgehoben, daß die Möglichkeiten, die Oberwolfach bietet, besonders geeignet sind, die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Mathematikern und Ingenieuren vor allem bei der schnelleren Umsetzung neuer theoretischer Entwicklungen in praktische Verfahren zu verbessern.

Ein weiterer Akzent liegt derzeit in der Anwendung adaptiver Verfahren in der Regelungstechnik. Erste Ansätze von Stabilitätsaussagen sowie Konvergenzbeweise für diese ebenfalls nichtlinearen Systeme sind in jüngster Zeit erzielt worden. Daher soll auch der Entwicklung dieses Gebiets in Zukunft eine stärkere Aufmerksamkeit zuteil werden.

Vortragsauszüge

J. Ackermann: <u>Finite Effect Sequences</u>

For discrete-time linear systems the concept of "finite effect sequences" is introduced. They bring the system from zero state to zero state in a nontrivial way. It is shown, that all such sequences can be generated from m basic sequences (m = number of inputs) by time shift, multiplication by a constant and addition. The elements of the basic sequences are exactly the parameters which can be changed by state feedback. The feedback matrix can be specified by closed-loop basic sequences, they in turn are closely related to the closed-loop eigenvalues. This formulation is suited for the usual engineering tradeoffs between eigenvalue location and required gains. Other properties of finite effect sequences are summarized: Determination by minimal realization, model testing, failure detection, reduction of control inputs and error correction.

P. Brunovský: <u>An Optimal Control Problem Arising in Hematology</u>

Overdosing radiotherapy or cytostatic drugs may lead to massive anemia which can be reduced by a certain therapy influencing the maturation rate of the red blood cells. The problem of optimizing this therapy can be mathematically formulated using the first order partial differential equation modelling the dynamics of the population of the red blood cells which has been developed by Lasota, Mackey and Ważevska-Czyżewska. It leads to a non-standard optimal control problem.
This optimal control problem is mathematically analysed. Necessary conditions of optimality and explicit numerical results for a simplified problem are obtained. The question, how far the results justify the therapy which has successfully been applied by Ważevska-Czyżewska, is discussed.

R. F. Curtain: Invariance Concepts for Infinite Dimensional Systems

(A,B)-invariance of a subspace V of a Hilbert space X is defined by $A(V \cap D(A)) \subset V + \mathrm{Im}\, B$. Considering the linear system $\dot{x}=Ax+Bu$ on X, this concept is related to the concept of "holdability", namely, any point beginning in V can be kept in V by choosing an appropriate control law u. In infinite dimensions these two concepts are in general different, which leads to problems in applying the geometric approach to solving the disturbance decoupling problem in infinite dimensions. Under certain conditions one does obtain a satisfactory solution.

E. D. Dickmanns: Von der Regelungstheorie durch Rechnersehen zur künstlichen Intelligenz

Zur Steuerung von Prozessen, die auf nicht längerfristig vorhersehbare Umgebungsereignisse reagieren sollen, ist der Gesichtssinn ein flexibles Meßsystem (z.B. Fahrzeugsteuerung); es sind weltweit stark zunehmende Bestrebungen im Gange, Digitalrechnern den Gesichtssinn als Informationsquelle zu erschließen.
Hierbei sind Einzelmerkmale nicht wie bei konventionellen Meßkanälen unmittelbar bestimmten Zustandsgrößen zugeordnet. Vielmehr muß in größerem Umfang Hintergrundwissen eingesetzt und über einen ausgedehnten Zeitraum die Szene beobachtet werden, um relevante Merkmale zu erkennen und daraus auf Zustände von Objekten zu schließen.
Aufbauend auf den dynamischen Modellen der Regeltheorie wird ein Ansatz zum Rechnersehen besprochen, der an einfachen Modellaufgaben getestet wurde. Einzelne Problemkreise und Laboraufbauten zur Erprobung der Theorie werden näher erlautert.

N. Dourdoumas: Systementwurf bei Begrenzungen

Es wird eine Methode vorgestellt, um den Maximalwert der Ausgangsgröße eines linearen, zeitinvarianten Systems zu ermitteln. Hierbei geht man davon aus, daß die Eingangsgröße des Systems betragsmäßig beschränkt ist und daß deren Änderungsgeschwindigkeit ebenfalls dem Betrage nach beschränkt ist. Diese Methode ermöglicht - entsprechend angewandt - eine rechnergestützte Reglersynthese mit dem Ziel, die Werte der Regelabweichung, der Stellgröße und der interessierenden Zustandsvariablen innerhalb vorgegebener Schranken zu halten.

M. Fliess: Some Elementary Remarks on the Computation of Optimal Nonlinear Feedback Laws

Simple computations using Hamiltonian formalism and Lie brackets of vector fields show that the optimal feedback law satisfies a system of quasi-linear partial differential equations. We give simple numerical illustrations of our method using several examples from the literature, some from realistic models.

M. L. J. Hautus: Linear Matrix Equations with Applications to the Regulator Problem

Two theorems are given on the existence of a solution of a linear matrix equation. These theorems are applied to the regulator problem with internal stability. The main result is a new condition in terms of transmission polynomials for the solvability of this problem. Also, a simple proof is given of a known condition for the well-posedness of the problem. Finally, the results are extended to the case where the exosystem is not necessarily completely unstable.

D. Hinrichsen: Stabilization Under Structural Constraints

The concept of fixed modes is basic for the stabilization of time-invariant linear systems by linear output feedback of prescribed structure. As an introduction three basic theorems, due to Wang and Davison, Anderson and Clements, Corfmat and Morse, are presented for arbitrary feedback configurations. We then consider an interconnected system where the subsystems influence each other via some dynamic interaction system. It is assumed that each subsystem acts on the interactive system only by its outputs and that the interaction system acts on the subsystems only through their input channels. We show that the overall system can be stabilized by decentralized dynamic output feedback, if each subsystem is stabilizable and the dynamic interaction system is stable.

Finally sufficient conditions are derived for an interconnected system to be stabilizable by decentralized state feedback. The conditions are obtained by combining a state space version of the small gain theorem with results of J.C. Willems on almost invariant subspaces. The stabilizing feedback law is in general of high gain type and the closed loop system has nice robustness properties.

A. Isidori: <u>The Synthesis of Prescribed Input-Output Behavior for Nonlinear Systems</u>

Given a nonlinear system of the form

$\dot{x} = f(x) + g(x)u$,

$y = h(x)$

the problem is to synthesize a state feedback controller

$\dot{z} = a(z,x) + b(z,x)v$,

$u = c(z,x) + d(z,x)v$

in order to make the input-v/output-y behavior of the closed loop system equal to the one of a prescribed linear model.

It is known that, in the case of a linear system, the solution of this problem depends essentially on the "structure at infinity" of the transfer function of the system to be controlled and of the model. A completely similar situation is shown to exist for the nonlinear problem, in terms of a formal "structure at infinity" defined on the triple f(x), g(x), h(x).

B. Jakubczyk: <u>Realizations of Nonlinear Systems; Existence and Constructions</u>

We consider the problem of existence of local realizations of nonlinear systems in the class of general nonlinear systems. By a local realization of a system we mean a realization which has, for small times, the same behavior as the response of the system. We are looking for minimal hypotheses under which a local realization exists. For piecewise constant inputs the minimal hypothesis sufficient (and necessary) for the existence consists of two conditions: regularity of the response map with respect to switching times (of class C^k) and a rank condition. For general controls (piecewise continuous, measurable) the regularity condition should be strengthened: the response should be regular (of class C^k) with respect to the switching times and has some regularity with respect to the values of the controls (at least continuity).

T. Kaczorek: <u>Eigenvalue Assignment Problem for 2-D Systems</u>

Consider a 2-D system described by the equation (Roesser's model)
$x' = Ax + Bu$,
where

$$x' = \begin{bmatrix} x^h(i+1,j) \\ x^v(i,j+1) \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x^h(i,j) \\ x^v(i,j) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$x^h(i,j) \in R^{n1}$ is the horizontal state vector,
$x^v(i,j) \in R^{n2}$ is the vertical state vector,
$u = u(i,j) \in R^m$ is the input vector.
The closed-loop system with state feedback law
$u = v - Fx$
is described by
$x' = A_c x + Bv$,
where
$A_c = A - BF$
$v = v(i,j) \in R^m$ is the control input vector.
The 2-D characteristic polynomial of A is defined by

$$p(z_1,z_2) = \begin{vmatrix} I_{n1}z_1 - A_1, & -A_2 \\ -A_3, & I_{n2}z_2 - A_4 \end{vmatrix} = \sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_2} a_{ij} z_1^i z_2^j .$$

The 2-D characteristic polynomial is separable iff

$$p(z_1,z_2) = p_1(z_1)p_2(z_2) .$$

The problem can be stated as follows: Given A, B and the set of 2-D eigenvalues
$E = \{(z_{1i},z_{2j}): (0,0) < (i,j) \leq (n_1,n_2)\} \quad z_{10} = z_{20} = 0$,
find F such that A_c has a separable characteristic polynomial with the given E. Sufficient conditions are given for the existence of a solution to the problem. Two algorithms for finding F are presented and illustrated by numerical examples.

F. Kappel: Approximation of Feedback Laws for Delay Systems

We consider the linear quadratic control problem for delay systems of retarded type. It is well known that the optimal control is a feedback control where the feedback is governed by a positive semidefinite selfadjoint operator which solves a Riccati equation. Since it is in general impossible to solve this operator equation, the problem of numerical approximation arises. We discuss (referring to joint work with D. Salamon, Bremen) one approach for approximating this infinite dimensional problem by high order ODE problems using spline approximation for the state. Finally we present some of our numerical findings.

G. Kern: Zum Stabilisierungsproblem von linearen nichtautonomen Systemen in Hilbert-Räumen

In einem separablen Hilbert-Raum X wird das lineare nichtautonome System

$\dot{x}=A(t)x+B(t)u,\ A\in L^1_{loc}(R_+,L(x)),B\in C(R_+,L(Y,X)),u\in\Omega\subset L_{loc}(R_+,Y)$

betrachtet und der Begriff der Stabilisierbarkeit unter Berücksichtigung von zwei unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten eingeführt. Zuerst wird das Stabilisierungsproblem in dem Sinne definiert, daß durch geeignete Wahl von Eingangsfunktionen das System ein vorgegebenes Stabilitätsverhalten besitzt. Für diese Problemstellung werden notwendige und hinreichende Bedingungen angegeben.

Stabilisierbarkeit und Entdeckbarkeit werden in der Kontrolltheorie aber auch dazu verwendet, Annahmen über die Steuerbarkeit bzw. Beobachtbarkeit abzuschwächen. In diesem Sinne werden die beiden Definitionen gemacht und damit gezeigt, daß, wenn das System gleichmäßig stabilisierbar ist und (L_a^p,L_b^q)-stabil, daraus folgt, daß das homogene System exponentiell stabil ist. Abschließend wird die Dualitat der beiden Begriffe gezeigt.

H. Kiendl: Eine erweiterte Strategie für lineare Abtastsysteme auf der Basis des Theorems von Cayley-Hamilton

Es wird eine Regelstrategie für lineare Abtastsysteme unter Berücksichtigung einer Stellgrößenbeschränkung beschrieben. Die Strategie stützt sich auf die bekannte Steuerfolge u_0, u_1, ..., u_{n-1}, mit der sich ein Punkt $\underline{x}$ in n Schritten ausregeln läßt. Für den Fall, daß das erste Element dieser Steuerfolge nicht der gegebenen Stellgrößenbeschränkung genügt, wird die gesamte Steuerfolge mit Hilfe des Theorems von Cayley-Hamilton analog zu dem in der Zeitschrift "Regelungstechnik", Heft 8, 1980, beschriebenen Verfahren in eine "äquivalente" Steuerfolge umgewandelt, die um r Schritte verlängert ist und bei der die Stellgrößenbeschränkung zumindest für das erste Element erfüllt ist. Es wird gezeigt, daß sich die Steuergröße, die aus dieser Regelstrategie resultiert, als Ausgangsgröße eines nichtlinearen Reglers erzeugen läßt, der aus einem linearen dynamischen System der Dimension r-1 und einer nachgeschalteten Sättigungskennlinie besteht. Es werden hinreichende Kriterien für die globale bzw. für die G-Stabilität der resultierenden Regelungssysteme hergeleitet. Es wird gezeigt, daß die gewünschte Stabilität stets gewährleistet ist, wenn das Abtastsystem aus einer ursprünglich kontinuierlichen Regelstrecke unter Zugrundelegung einer hinreichend großen Abtastzeit hervorgegangen ist. Beispiele zeigen, daß die resultierenden nichtlinearen Regler - bezogen auf jeweils dieselbe Abtastzeit - zu Ausregelzeiten führen, die nur geringfügig oberhalb derjenigen liegen, die sich bei Zugrundelegung derselben Abtastzeit mit Hilfe einer der bekannten, aufwendigen zeitoptimalen Regelstrategien ergeben.

G. Kreisselmeier: Zur Stabilität adaptiver Regelkreise

Für die Stabilität eines adaptiven Regelkreises ist es erforderlich, daß der adaptive Regler selbsttätig solche Rückführsignale erzeugt, die für die Regelung und eine ausreichende Identifikation der Regelstrecke geeignet sind. Es wird gezeigt, wie und mit welcher a priori Kenntnis über die Parameter der Regelstrecke dies in adaptiven Regelkreisen, die auf einer expliziten Identifikation der Regelstrecke beruhen, erreicht werden kann.

K. Kunisch: Parameter Estimation - A Survey of Recent Results

We consider the problem of determining unknown coefficients in a model equation (partial differential equation) from given observations y of a physical system. Mathematically this is put in terms of a minimization problem:

(P) $\min\limits_{Q_{ad}} |Eu(q) - \hat{y}|^2$ with $\dot{u}(t) = A(q)u(t),\ t > 0$

$u(0) = u_0$

where Q_{ad} is an admissable set of parameters, $A(q)$ is the infinitesimal generator of a C_0-semigroup, for each $q \in Q_{ad}$, and E is an appropriately defined observation operator.
We discuss the problem of approximating (P) by sequences of computationally implementable schemes and define the concept of parameter estimation convergence. By means of a specific example we next describe some phenomena of (P) (nonexistence - regularisation effect). We finally consider the effect of changes in y on a solution $\bar{c}$ of (P). If the derivative of $q \longrightarrow E(u(q))$ is invertible at $\bar{c}$, then the solutions of (P) depend locally uniquely and continuously on the observation. This is demonstrated for a simple example.

H. Kwakernaak: Minimax Frequency Domain Optimization of Linear Feedback systems

The formulation of design criteria for multivariable linear feedback systems in terms of bounds of certain system functions on the imaginary axis leads to a minimax frequency domain optimization problem. Using a result related to the "equalizer" rule from statistical decision theory the problem is reduced to determining a certain solution of a pair of matrix polynomial equations.

J. Lückel: Entwurf und Realisierung von Mehrgrößenreglern

Für einen Ingenieur, der praktischen Nutzen aus der Fülle der neuen Arbeiten auf dem Gebiet der Regelungstheorie ziehen will, ist es außerordentlich schwierig, die Richtungen auszuwählen, die für seine praktische Arbeit Fortschritte bringen. Die Paderborner Gruppe (Automatisierungstechnik im Maschinenbau) hat sich deshalb die Sammlung, Sichtung und Weiterführung von Entwurfsverfahren von Mehrgrößenreglern für typische Regelprobleme des Maschinenbaus als Aufgabe gestellt. Letztendlich kann ein Urteil über die Qualität einer Regelung nur nach einer Realisierung in einem nichttrivialen Laborversuch abgegeben werden.
Deshalb entstand in den letzten Jahren ein anwendungsnahes Instrument zum Entwurf von Mehrgrößenreglern für den Ingenieur. Schwerpunkt bildet die Regelung von hydraulischen, mechanischen

und elektromechanischen Systemen. Realisiert wurden theoretische Bausteine und Programmodule, die völlig voneinander entkoppelt angewendet werden können.
Dabei spielt neben der Ergänzung des Streckenmodells um dynamische Systeme für Anregung und Bewertung, neben dem eigentlichen Entwurf der Regelung die statische Kompensation von deterministischen Störungen eine wichtige Rolle.
Für eine Klasse derartiger Störungen (A_e, die Systemmatrix des Anregungsmodells hat grenz- oder instabile Pole) wird ein Verfahren angegeben, das alle denkbaren Möglichkeiten (vollständige oder unvollständige Kompensation) anschaulich deutbar und numerisch stabil zu bearbeiten gestattet.

M.Mansour: <u>Multivariable Normal-Form for Model Reduction of Discrete Systems</u>

A method of model reduction of linear discrete systems is discussed. It has the characteristics of preserving stability property and the steady state response and is based on the discrete version of the Schwarz-matrix for continuous systems. Due to the special structure of the matrix the (m-1)th order reduced model has the same structural properties as the m-th order model so that a step-by-step reduction is possible. Two multivariable normal forms are derived by extending the SISO case and using Luenberger first multi-input normal form as a basis. It is shown that the same reduction method can be used for the multivariable case getting the same characteristics as in the SISO case.

P. C. Müller: <u>Partielle asymptotische Stabilität (Ausgangsstabilität)</u>

In einer Reihe neuerer Arbeiten wurde das Stabilitätsverhalten von Kreiselsystemen mit Hilfe des Begriffs der partiellen asymptotischen Stabilität, d.h. der Ausgangsstabilität erklärt. Diese Untersuchungen werden zum Anlaß genommen, einen Überblick über die Ergebnisse zum Problem der partiellen asymptotischen Stabilität zu geben und die Bedeutung dieses in der Mechanik bekannten Stabilitätsbegriffs für die Regelungstechnik zu überprüfen. Im Vordergrund stehen dabei nichtlineare, zeitinvariante Systeme. Hierfür werden mit Hilfe von Ljapunov-Funktionen hinreichende Stabilitätskriterien formuliert. Kriterien für die partielle asymptotische Stabilität nach der Theorie der ersten Näherung werden ebenfalls dargestellt, die auf einer vollständigen Theorie der partiellen asymptotischen Stabilität für lineare, zeitinvariante Systeme aufbauen. Abschließend wird für lineare Systeme das Problem der Ausgangsstabilisierbarkeit diskutiert; es werden dabei die Ergebnisse von Wonham und Vorotnikov gegenübergestellt.

H. Nour-Eldin: <u>The Determination of the Stability Region of Multimachine Power System Networks</u>

The stability of the nonlinear system of multimachine power system

$$\dot{d}_j = w_j \quad , \; M_j\dot{w}_j = P_{mj} - P_{1j} \quad ; \; j = 1,2,\ldots,n$$

with

$$P_{1j} = E_j^2 G_{Mij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} C_{ij} \sin(d_{ij}) + D_{ij} \cos(d_{ij})$$

is characterized by the fact, that, besides the "normal" operating point, there are $2(2^{n-1}-1)$ possible physically relevant stationary points. A relatively small number of these points is near the normal operating point and influence therefore the region of stability. These points are known as the controlling stationary points.

By imbedding the algebraic equations $P_{mj}-P_{mj} = 0$ in the algebraic loadflow problem, one is able to characterize the conditions for the existence of a stationary point in such a way that enables developing an algorithm with which every possible existing stationary point can be computed, according to a selection rule, selectively and independent on the starting points. Using special techniques that characterize the selection for the controlling points, the above algorithm is used to determine the stability region of a given Ljapunov-function for the normal operating point.

A. Olbrot: <u>Observers for State-Affine Systems</u>

The following systems are considered:

$$(*)\quad x(t+1)=A(u(t))x(t)+B(u(t)),\quad y(t)=C(u(t))x(t)+D(u(t)),$$
$$t=0,1,\ldots$$

Also the continuous-time systems are considered and by assuming $u(t) = u([t])$, $t \geq 0$, are rewritten in form (*). For system (*) definitions of distinguishibility, observability, and generic (with respect to inputs u(t)) observability are stated as well as the final versions (concerning observability of a final state on a given interval of time). Under the assumption that A and C are meromorphic in u, a set of computable criteria for observability notions is presented. Next it is shown that existence of a non-linear asymptotic observer implies the existence of a linear (in x) one. A constructive method is given to calculate the coefficients (dependent on u) of the linear observer.

C. Olech: Decomposability as a Substitute for Convexity

A subset K of L_1 space is called decomposable if for any two elements u,v from K and each measurable function X assuming only two values 0 or 1

$Xu + (1-X)v \in K$.

The set of integrable selections of a set-valued map has this property. Though decomposability is in a sense far from convexity, it has some implications similar to those one can obtain from convexity assumption. Several examples of such implications were given in the lecture. Among them an analogue to Michael theorem on continuous selections.

G. J. Olsder: On the Optimal Manoeuvering during Bearings-only Tracking

A method is described which determines optimal steering patterns of the own ship such that the position of the target - of which bearings-only measurements (passive sonar) are available- can be reconstructed as well as possible. Due to the complexity of the calculations, this method cannot be used on line. The numerical results indicate that in general a manoeuvre which resembles a zigzag pattern with two legs is optimal. The angles which these two legs make with respect to the line of sight depend on the parameters of the problem such as for instance the distance to the target. The larger this distance, the more perpendicular these legs are with respect to the line of sight. Another conclusion is that a lower velocity of the own ship yields less accurate results. The conclusions drawn above are valid within the context of the assumptions made in this paper. If for instance another criterion in the optimal control problem is chosen - other than minimizing the variance of the distance to the target at the final time - the conclusions are not necessarily valid any more.

H. Schwarz: Zeitdiskrete Regelung bilinearer Systeme

Nach einer kurzen Einführung der Definition bilinearer Systeme und der Ein-/Ausgangsbeschreibung dieser Systeme durch Volterrasche Reihen werden die Verhältnisse bei abgetasteten bilinearen Systemen beschrieben. Auf die Existenz von Markovparametern für diese Systeme wird hingewiesen. In Aussicht genommene Anwendungen werden kurz geschildert.

D. D. Siljak: Complex Dynamic Systems

"Complexity" is a new challenging notion in system theory. I shall critically review the present activities and prospects of research in complex dynamic systems with an emphasis on dimensionality, information structure constraints, and uncertainty. Biased by my own experience, I believe that in the broader context, this choice of the characterization of complexity reflects the present trend of system theory and practice, and that it will be constructive in future developments of the field. The presentation is neither impersonal nor encyclopaedic, but rather is a projection of my own interests in the chaotic but exciting area of complex dynamic systems.

H. J. Sussmann: Some Recent Results on Nonlinear Filtering

Consider a nonlinear filtering problem in which the observations Y_t are given as the sum of an integral

$$\int_0^t S_z dz$$

plus a Wiener process V_t. The signal process S_t is of the form

$h(X_t)$, where X_t is the state of the plant at time t, and h is a function. The observation noise V_t is assumed to be independent from the X process. The problem discussed in this talk is that of finding the conditional statistics of X_t given the observations up to time t. If F is a bounded measurable function on the state space, then the conditional expection $\hat{F}_t$ of $F(X_t)$ given the observations up to time t is given by the Kallianpur-Striebel formula (KSF). Since this is true for all F, it follows that the KSF actually determines M_t, the conditional probability distribution of X_t. The KSF is not recursive, but one can formally derive from it another formula, the Zakai equation, which is recursive and expresses the M process as a solution of a Cauchy problem for a stochastic P.D.E. driven by the Y process. A rigorous derivation of the ZE has recently been provided by D. Ocone. Also, Ocone and T. Kurtz have proved uniqueness of solutions for the ZE. However, both the KSF and the ZE involve stochastic integrations with respect to dY, and it is therefore not possible to plug in a particular observation path G and determine M_t or the $\hat{F}_t$ given that path. However, if G is piecewise continuously differentiable, then both the KSF and the ZE become perfectly meaningful when dY is replaced by Gdt. The last part of the talk is devoted to the problem whether the functionals of G that are obtained in this way really represent the objects of interest to us. Some positive results exist, but there are cases, such as the two-dimensional cubic sensor, where the situation remains mysterious.

M. Thoma: <u>Process Computer Application for the Optimization of a Railway System</u>

A realization of a time and energy optimal feed forward control with constraints and on-line feedback for a model railway plant is presented. The network consists of two loops which have common sections (conflicting sections) where two trains run in opposite directions. The trains are controlled by a digital 6-bit-wide speed command transmitted by a multiplexed infra-red signal; the power supply is centralized. The dynamic behaviour of the train can be approximatively described by a second order model

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)\,, \qquad x_1(0) = x_0\,, \quad x_2(0) = 0$$
$$\dot{x}_2(t) = u(t) \qquad\qquad x_1(T) = x_2(T) = 0$$

where x_0 characterizes the distance and u(t) is the control. In order to save energy we assume an energy optimal trajectory for a train running from station A to B (two revolutions) within minimal running time T. This leads to the cost functional

$$J(u,T,k) = \int_0^T (k + \frac{1}{2} u^2(t))dt = kT + \frac{1}{2} \int_0^T u^2(t)dt = J_1(T,k) + J_2(u,T) .$$

In order to solve this "state" constraint problem in a first step only the term $J_2(u,T)$ is minimized under the assumption that T is fixed; the optimal trajectory $x_{1opt}(t,T)$ for the unconstraint problem is then a cubic polynomial in t, where the terminal time T is a free parameter. In a second step the optimal end time T is computed. Whereas the term $J_2(u_{opt},T)$ represents a hyperbolic proportional to T^{-3} the term $J_1(T,k)$ increases linear with T. For a positive T the sum of the two parts is convex and therefore a unique solution for the optimal trajectory exists. However, due to the conflicting sections constraints on the state space exist, while by choosing the right cost factor k the optimal solution does not violate the constraints of the control space. If it happens that an optimal trajectory crosses the conflicting domain, which is a domain called "window", other internal conditions have to be fulfilled. One, however, knows that the optimal solution has to pass either through a permissible corner. To determinate the optimal solution one has to compute which one of the two trajectories is the minimal one.If, however, this trajectory passes through another window, the last step has to be repeated and so on; this leads to an algorithm comparable to dynamic programming. It can be proved that the optimal solution belongs to the class of piecewise cubic polynomials (spline functions) which fulfill as well the boundary as the internal conditions. The complete software was formulated in the real-time language PEARL. A film of the model railway plant has been shown, which demonstrated that the realized system works very well.

H. Tolle: Lernende Regelkreise auf neurobiologischer Grundlage

Stark nichtlineare Strecken können vielfach nur parameteradaptiv geregelt werden, wobei die Parameter einer i.a. linearen Prozeßnäherung laufend geschätzt und die Parameter des linear angesetzten Reglers laufend an das sich gemäß den angefahrenen Arbeitspunkten verändernde Prozeßmodell angepaßt werden. Alle höheren Lebewesen zeigen eine große Flexibilität in der Anpassung an sich verändernde Situationen, die auf der Fähigkeit beruht, beliebige auch nichtlineare Zusammenhänge zu lernen und in ähnlichen Situationen ähnlich zu reagieren. Es wird ein Regelkreiskonzept erörtert, das über eine allgemeine mathematische Abbildung von n Eingängen auf m Ausgänge ein i.a. nichtlineares prädiktives Prozeßmodell lernt und in einem einzelne Lernwerte lokal verallgemeinernden - d.h. für ähnliche Situationen ähnliche Werte erzeugenden - assoziativen Speicher ablegt. Mit Hilfe eines das Regelungsziel widerspiegelnden Gütekriteriums kann über dieses Prozeßmodell jeweils planend die günstigste Regelstrategie ausgesucht werden. Sie wird in einem weiteren lokal verallgemeinernden lernenden Element als Regler abgelegt und entweder direkt, oder um den Lernvorgang zu beschleunigen, etwas verändert auf den Prozeß gegeben. Im Laufe der Zeit wird so eine optimale Regelstrategie für alle relevanten Situationen aufgebaut, so daß der Regler i.a. ohne Rückgriff auf Prozeßmodell und planende Optimierung den Prozeß in der gewünschten Art führt. Die bei der adaptiven Regelung stets notwendige obere Anpassungsebene entfällt. Die Leistungsfähigkeit des Konzepts wird am Beispiel einer simulierten pH-Wert-Regelung nachgewiesen.

J. C. Willems: From Time Series to Linear System

The following problem was posed: Given a q-dimensional time series ... $w(-1)$, $w(0)$, $w(1)$, ..., $w(t)$,..., find a linear time-invariant finite dimensional system which models this time series and as little else as possible. First it was shown that such a minimal model exists and then an algorithm was presented which computes this model in (AR)-form, i.e. in the form

$R_0 w(t) + R_1 w(t-1) + \dots + R_L w(t-L) = 0.$

It was also discussed how such (AR)-models relate to the more classical input/output models.

M. Zeitz: Kanonische Formen nichtlinearer Systeme

Kanonische Formen (Normalformen) der Zustandsdarstellung dynamischer Systeme besitzen für gewisse Aufgabenstellungen besonders geeignete Strukturen. Für lineare Systeme werden neben der Diagonal- oder Jordan-Form sehr häufig

- die STEUERBARKEITS- und die BEOBACHTBARKEITS-Normalform zum Nachweis der Steuer- bzw. Beobachtbarkeit und
- die REGELUNGS- und die BEOBACHTER-Normalform für den Entwurf von Zustandsreglern und Beobachtern

verwendet. Der Vortrag befaßt sich mit der Definition, den Eigenschaften und den Transformationsbeziehungen dieser Normalformen für nichtlineare Systeme

$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x},u)$ oder $\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}) + \underline{g}(\underline{x})u$, $\underline{x}(0) = \underline{x}_0$; $y = h(\underline{x},u)$.

Die Anwendung der kanonischen Formen bei nichtlinearen Systemen bleibt wegen der sehr weitgehenden Voraussetzungen für die Existenz, Bestimmung und Ausführung der nichtlinearen Transformationen auf eine kleine Systemklasse beschränkt. Andererseits lassen sich aber verschiedene Analyse- und Syntheseaufgaben in den kanonischen Koordinaten - wie im linearen Fall - auch für nichtlineare Systeme exakt und sehr einfach behandeln.

Berichterstatter: Axel Munack

Tagungsteilnehmer

Dr. Jürgen Ackermann
DFVLR - FF - DF

8031 Oberpfaffenhofen

Prof. D. Franke
Fachb. Elektrotechnik
Hochschule der Bundeswehr Hamburg
Holstenhofweg 85

2000 Hamburg 70

Prof. P. Brunovsky
Institut of Applied Mathematics
Comenius University
Mlynska Dolina

84215 Bratislava, Czechoslovakia

Prof. W. Hahn
Alberstr. 8

A - 8010 Graz
(Österreich)

Prof. Ruth F. Curtain
Rijksuniversiteit Groningen
Mathematisch Instituut
Postbus 800

9700AV Groningen
Netherlands

Prof. M.L.J. Hautus
Dept. of Mathematics
University of Technology

Eindhoven
The Netherlands

Prof. E. D. Dickmanns
Institut für Systemdynamik und
Flugmechanik
HSBW München
W. Heisenberg Weg 39

8014 Neubiberg

Prof. D. Hinrichsen
Universität Bremen
MZH
Postfach

2800 Bremen 33

Prof. N. Dourdoumas
Theorie der Automatisierungssysteme
Universität - GH - Paderborn
Pohlweg 47 - 49

D 4790 Paderborn

Prof. E. Hofer
Arbeitsbereich Regelungstechnik
und Systemdynamik
Techn.Universität Hamburg-Harburg
Eißendorfer Str. 38

2100 Hamburg 90

Prof. M. Fliess
Laboratoire des Signaux et Systêmes
C.N.R.S. - E.S.E.
Plateau du Moulon

91190 Gif-sur-Yvette,
Frankreich

Prof. Alberto Isidori
Dipartimento di Sistemistica
Università di Roma
18 Via Eudossiana

I 00184 Rom

Prof. B. Jakubczyk
Institut of Mathematics
Polish Academy of Sciences
Sniadeckich 8

00950 Warsaw (Poland)

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

8700 Würzburg

Prof. Tadeusz Kaczorek
Politechnika Warszawska
ul. Koszykowa 75

00662 Warszawa (Poland)

Professor Manfred Köhne
Institut für Systemdynamik
und Regelungstechnik
Universität Siegen
Paul Bonatz-Str. 9 - 11

5900 Siegen

Prof. F. Kappel
Institut für Mathematik
Universität Graz
Elisabethstr. 16

A 8010 Graz (Austria)

Professor W. Krabs
Fachbereich Mathematik
der Techn. Hochschule Darmstadt
Schloßgartenstr.7

6100 Darmstadt

Prof. G. Kern
Institut für Mathematik
Techn.Universität Graz
Kopernikusgasse 24

A 8010 Graz (Austria)

Dr. G. Kreisselmeier
Deutsche Forschungs- u.
Versuchsanstalt
Forschungsbereich Flugmechanik

8031 Weßling

Prof. Harro Kiendl
Lehrstuhl für Elektrische
Steuerung und Regelung
Universität Dortmund
Postfach 500500

4600 Dortmund 50

Prof. K. Kunisch
Institut für Mathematik
Technische Universität Graz
Kopernikusgasse 24

A 8010 Graz (Austria)

Prof. A. Kistner
Institut A für Mechanik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9

8000Stuttgart 80

Prof. H. Kwakernaak
Dept. of Applied Math.
Twente Univ. of Technology
P.O. Bos 217

7300 AE Enschede
The Netherlands

Prof. G. Ludyk
Universität Bremen
FB 1
Postfach 330440

2800 Bremen 33

Prof. J. Lückel
Fachgr. Automatisierungstechnik
FB 10
Uni GH Paderborn
Pohlweg 47 - 49

4790 Paderborn

Professor M. Mansour
Fachgruppe für Automatik
ETH Zentrum

CH 8092 Zürich

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

5600 Wuppertal 1

Dr.-Ing. A. Munack
Institut für Regelungstechnik
Universität Hannover
Appelstr. 11

3000 Hannover 1

Prof. H. Nour Eldin
Automatisierungstechnik u.
Technische Kybernetik
Bergische Universität GH Wuppertal
Fuhlrottstr. 10

5600 Wuppertal

Prof. A. Olbrot
Instytut Automatyki,
Politechnika Warszawska

00-665 Warszawa, (Poland)

Prof. C. Olech
Instytut Matematyczny PAN
Sniadechich 8

00950Warszawa (Poland)

Prof. G. J. Olsder
Dept. of Mathematics
Delft University of Technology
P.O. Box 356

2600 AJ Delft (Netherlands)

Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz
Fachb. 7 - Maschinenbau
Universität Duisburg-Gesamthochschule
Postfach 101629

4100 Duisburg 1

Prof. D.D. Siljak
University of Santa Clara

Santa Clara, California 95053
USA

Prof. H.J. Sussmann
Mathematics Department
Rutgers University

New Brunswick, NJ 08903
USA

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

3000 Hannover 1

Prof. J.C. Willems
Mathematics Institute
P.O. Box 800

9700 AV Groningen
The Netherlands

Prof. H. Tolle
Institut für Regelungstechnik
Fachgeb. Regelsystemtheorie
Techn.Hochschule Darmstadt
Schloßgraben 1

6100 Darmstadt

Prof. J.L. Willems
Rijksuniversiteit Gent
Grotesteenweg-Noord 2

B 9710 Gent(Zwijnaarde) Belgien

Prof. Inge Troch
Techn.Universität
Karlsplatz 13

A 1040 Wien, Österreich

Prof. M. Zeitz
Institut für Systemdynamik und
Regelungstechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9

7000 Stuttgart 80

Professor G. Vossius
Inst. f.Biokybernetik u. Biomedizin.
Technik
Universität Karlsruhe
Kaiserstr.12

7500 Karlsruhe

Gefördert durch
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft