

MATHEMATISCHES FORSCHUNGSINSTITUT OBERWOLFACH

T a g u n g s b e r i c h t 9/1986

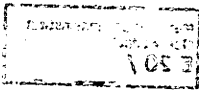
Regelungstheorie

2.3. bis 8.3.1986

Die diesjährige Tagung über Regelungstheorie wurde von H.W. Knobloch (Würzburg) und M. Thoma (Hannover) gemeinsam vorbereitet. Da M. Thoma jedoch nicht an der Tagung teilnehmen konnte, wurden die ingenieurwissenschaftlichen Aspekte bei der Tagungsleitung in Oberwolfach diesmal von A. Munack (Hamburg-Harburg) vertreten.

Mit 35 teilnehmenden Wissenschaftlern bewegte sich die Teilnehmerzahl etwa im Mittel der früheren Tagungen; ungefähr die Hälfte der Teilnehmer kam aus dem Ausland. Darin zeigt sich auch die internationale Anerkennung, die die Regelungstheorie in Oberwolfach seit der ersten Tagung 1969 (Leiter: W. Oppelt und P. Sagirow) in der Zwischenzeit gefunden hat.

Für die diesjährige Tagung war als Schwerpunktthema "Nichtlineare Regelungstheorie" gewählt und A. Isidori (Rom) für eine Reihe von Übersichtsvorträgen gewonnen worden. Die Resonanz dieser Vorträge war bei Mathematikern und Ingenieuren gleichermaßen überaus positiv. Wichtig war vor allem, daß hier wesentliche allgemeine Gesichtspunkte herausgestellt wurden, die naturgemäß bei den Einzelvorträgen, die der Darstellung aktueller Forschungsergebnisse dienten, nicht im Vordergrund standen.



Insgesamt war das vorgestellte Spektrum an Problemen und Methoden zum Thema nichtlineare Regelung sehr breit, wie die folgende Zusammenfassung zeigt. Zwei aufeinander aufbauende Vorträge befaßten sich mit bilinearen Systemen, wobei es um Regelgesetze ging, die sich nach dem Vorbild des Riccati-Entwurfs für lineare Systeme konstruieren lassen. Zwei Vortragende behandelten Grenzzyklen und Gleitbewegungen, wobei Fragen der Berechnung und Stabilität im Vordergrund standen. Zwei Vorträge waren dem Thema Approximation nichtlinearer Systeme gewidmet. Insbesondere wurde mit Hilfe von Taylor-Entwicklungen ein Reglerentwurf mit dynamischem Beobachter für nichtlineare Systeme vorgeschlagen. Drei Vorträge befaßten sich mit der Anwendung geometrischer Begriffsbildungen (Lie-Algebren) auf Steuerbarkeitsbedingungen bei nichtlinearen Systemen. Die Beziehungen zwischen Kriterien für lokale Steuerbarkeit und bekannten sowie neuen notwendigen Optimalitätsbedingungen kamen zur Sprache. Eine Besonderheit Hamiltonischer Systeme in der Kontrolltheorie wurde von einem Referenten diskutiert: Der Formalismus der Lie-Klammern kann weitgehend durch den einfacheren der Poisson-Klammern ersetzt werden. Dieser Vortrag machte vor allem Querverbindungen zur Differentialgeometrie und Mechanik deutlich. Schließlich gehört in diese Gruppe noch ein Vortrag, in dem erstmals Möglichkeiten erörtert wurden, das Instrumentarium der Differentialalgebra für das Problem des Reglerentwurfes nutzbar zu machen.

Drei Vorträge beschäftigten sich mit der Regelungstheorie bei Systemen mit verteilten Parametern; dabei wurden neben der Approximation des linear-quadratischen Problems für parabolische Gleichungen und des zeitoptimalen Problems für die abstrakte Wellengleichung die Existenz periodischer und fastperiodischer Lösungen für partielle Differentialgleichungen untersucht.

Bei den insgesamt sieben Vorträgen aus dem Bereich der "klassischen" Kontrolltheorie wurden mit Ausführungen zur  $H_{\infty}$ -Optimierung

und neuen Verfahren zur Behandlung diskreter Prozesse zwei neuartige und durchaus interessante Gebiete auf der Tagung vorgestellt. Die weiteren Vorträge bezogen sich auf andere Systemklassen, wie etwa die zweidimensionalen Systeme, wobei das Problem variabler Koeffizienten bearbeitet wurde, oder die linearen periodischen Systeme, für die erläutert wurde, wie freie Entwurfsparameter zu einer robusten Stabilisierung ausgenutzt werden können. Verfahren für lineare zeitvariante Systeme wurden in drei Vorträgen behandelt. Dabei stand einmal das Problem einer zuverlässigen Ermittlung einer Störgrößentkoppelung durch Ausgangsrückführung im Vordergrund; ein anderer Vortragender stellte ein Parametrisierungsverfahren zum Entwurf von (ggf. auch nichtlinearen und dynamischen) Reglern vor, und in einem weiteren Vortrag wurde ein Verfahren zur Modellreduktion zeitdiskreter Systeme erläutert.

Zwei Vorträge befaßten sich mit Themen aus dem Grenzgebiet Kontrolltheorie/Biokybernetik. Zum einen ging es um lernende Regelkreise, zum anderen um die Frage der künstlichen funktionellen Stimulation von Muskeln. Den zentralen Punkt des zweiten Vortrags bildeten Untersuchungen zum Einsatz von Optimierungsverfahren, die nach dem Vorbild der biologischen Evolution strukturiert sind.

Zusammenfassend kann man sicher feststellen, daß die diesjährige Tagung durch die Herausstellung des Schwerpunktthemas einen stärkeren mathematisch-theoretischen Akzent erhielt als frühere Tagungen. Die außerordentliche Aktualität des Themas wurde insbesondere auch dadurch deutlich, daß Beiträge zu diesem Themengebiet von etwa der Hälfte der Vortragenden geleistet wurden. - In der Information und Diskussion über neue, gerade im Gange befindliche Entwicklungen und der interdisziplinären Diskussion zwischen Mathematikern und Ingenieuren besteht aber gerade das Hauptanliegen der Tagungen über Regelungstheorie in Oberwolfach. Damit konnte auch die diesjährige Tagung dieser Zielvor-

stellung wieder in hohem Maße gerecht werden.

Die schon traditionelle Besprechung aller Teilnehmer am Donnerstagabend diente der Diskussion über den Verlauf der Tagung und über aktuelle Forschungsrichtungen, die gegebenenfalls Schwerpunkte der nächsten Tagung über Regelungstheorie bilden könnten, die vom 20. bis 26.3.1988 vorgesehen ist. Dabei waren sich die Teilnehmer darüber einig, daß auf dem Gebiet der Parameterschätzung und der adaptiven Regelung zur Zeit wesentliche Entwicklungen stattfinden, die auf der nächsten Tagung dargestellt und diskutiert werden sollten. Weitere interessante Themenbereiche könnten in den auch auf der diesjährigen Tagung vertretenen Gebieten "Systeme mit verteilten Parametern" und " $H_\infty$ -Optimierung" liegen.

### A. Isidori: Nonlinear Control Theory

The lectures consist of an introduction to some recent techniques for the control of nonlinear systems described by differential equations of the form

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x)u, \\ y &= h(x),\end{aligned}$$

where  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $y \in \mathbb{R}^n$ ,  $u \in \mathbb{R}^m$  and  $f, g, h$  are  $C^\infty$ . The control problems which are dealt with are the following ones: noninteraction, disturbance decoupling, model matching, nonlinearities compensation and stabilization in-the-large. The critical concept of the theory is the notion of the maximal controlled invariant distribution contained in the differential of  $h$ , noted  $\Delta^*$ . This concept plays a role in some sense similar to the zeros in a linear system. In particular, it was shown that it is rather easy, for a nonlinear system, to obtain noninteraction, disturbance decoupling and nonlinearity compensation from the input-output point of view; however, part of the dynamics of the closed-loop system becomes unobservable, confined to  $\Delta^*$ . If the projection of the dynamics on  $\Delta^*$  is "per se" stable, then one may solve control problems like the ones described above and, at the same time, get internal stability.

### D.P. Atherton: Limit Cycle Computations Using Describing Function and Tsytkin Type Methods

The presentation briefly reviews and compares the describing function and Tsytkin methods for evaluating limit cycles in single-input single-output nonlinear systems. It is shown how further computations can be added to the methods to check the solutions and determine unusual forms of limit cycles. These procedures are important since the describing function method initially gives an approximate solution, and the Tsytkin method

may in some cases give invalid results. The orbital stability of the limit cycle solutions is also considered and some theoretical results are given. The existence of unusual forms of limit cycles in relay systems is shown, these include limit cycles with multiple pulses per half period or sliding motion. Both continuous and discrete system are considered.

Extensions of the methods to systems with multiple nonlinearities are shown to be possible. Results are given for limit cycle behaviour of systems with multiple nonlinearities, multivariable systems and systems with multirate sampling. Finally attention is drawn to the need for additional and stronger theoretical results on the existence and stability of limit cycles.

R.M. Bianchini: Local Controllability along a Reference Trajectory

Let  $x(t)$  be the trajectory of an affine control system relative to the control  $u=0$  and starting at  $x_0$ . Sufficient conditions are given in order that  $x(t)$  be an interior point of the set of points which can be reached from  $x_0$  in time  $t$ , for each  $t$  greater than 0. The conditions are conditions both on the values of the fields which define the system and on their derivatives up to a suitable order in  $x_0$ . One of these conditions is also necessary for the property.

C. Corduneanu: Periodic and Almost Periodic Oscillations in Nonlinear Systems with Distributed Parameters

Using certain results on nonlinear qualitative inequalities, one obtains the periodicity or almost periodicity of solutions (bounded in convenient norms) for some classes of nonlinear partial differential equations of parabolic or elliptic type:

$u_t + \Delta u = f(t, x, u)$  ,  $u_t + P(D)u = f(t, x, u)$  ,  $u_{tt} + \Delta u = f(t, x, u)$  ,  
 $u_{tt} + P(D)u = f(t, x, u)$  , with  $t \in \mathbb{R}$  , and  $x \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$  .

For the second order equation the results are somewhat better than in the higher order case (when  $P(D)$  is an elliptic operator of order  $2m$ , with  $m$  greater than one). While the second order case can be dealt with by using Poincaré's inequality, the higher order case requires the use of Gårding inequality for elliptic operators in adequate Sobolev spaces .

#### M. Fliess: On Non-Linear Dynamic Feedback Systems: Towards a Differential Algebraic Approach

Until now, non-linear synthesis has been mainly studied via static state feedback. But, as for linear systems, it is easy to see that with such feedback many natural problems cannot be solved. Descusse-Moog and Isidori have shown recently that some peculiar dynamic feedbacks can be used in order to perform some decoupling problems. Here we take advantage of our recent solution of the long-standing problem of inverting multivariable non-linear systems and we give a complete theory of dynamic feedbacks which employs differential algebra. Differential algebra was created almost sixty years ago by the American mathematician J.F. Ritt in order to get a tool for differential equations which would play the same role as commutative algebra for algebraic equations. Note that this is a complete departure of all the techniques which were developed until now in non-linear system theory. We are now able to give a non-linear analogue of the rank of the transfer matrix. The very same results are obtained for discrete-time non-linear systems thanks to difference algebra, which is also due to Ritt and is related to difference equations.

D. Franke: Direkter algebraischer Reglerentwurf mit einem Parametrisierungsverfahren.

Das Verfahren geht von linearen, zeitinvarianten Zustandsraummodellen aus. Das Zeitintervall  $[0, \infty)$  wird mittels  $\tau = 1 - 2\exp(-\alpha t), \alpha > 0$ , auf das Intervall  $[-1, 1]$  abgebildet. Die Entwicklung aller Systemgrößen nach Legendre-Polynomen führt dann auf eine parametrisierte Darstellung. Diese eignet sich zum algebraischen Entwurf nichtdynamischer sowie dynamischer Regler bei vorgegebener Form der Führungssprungantwort des geschlossenen Kreises. Gegenüber den Frequenzbereichsverfahren von Truxal u. Guillemin (1960) sowie Weber (1967) bietet das vorgestellte Verfahren mehr Flexibilität und führt auf einfachere Regler. Da es sich nicht primär an Eigenwerten orientiert, kann es auf den Entwurf nichtlinearer Regler erweitert werden.

D. Hinrichsen : A Condensed Form Approach to Disturbance Decoupling by Output Feedback

A condensed form approach to disturbance decoupling is presented which is based on numerical ideas of Aplevich and van Dooren and has been developed systematically in the Ph.D. thesis of A. Linnemann (1984). Once a system has been transformed into the condensed form via orthogonal similarity transformations, the solvability of the decoupling problem can be checked by inspection, and corresponding feedback matrices can be computed by solving systems of linear equations. The method is attractive from a numerical point of view but also provides new structural insight, leading to solvability conditions in terms of signal flow graphs of the transformed system.



## E.P. Hofer: Reglerentwurf für bilineare Systeme

Die Modellierung dynamischer Prozesse führt sehr häufig auf stark nichtlineare Systeme von gewöhnlichen Differentialgleichungen. Bei multiplikativem Eingriff der Steuerung auf den Systemzustand kann in vielen Fällen das dynamische Verhalten des Prozesses durch ein bilineares System repräsentiert werden. Für zahlreiche praktische Anwendungen bietet sich als Entwurfskriterium für einen Regler ein quadratisches Kriterium an. Das Entwurfsproblem für den Regler führt damit auf die Lösung eines bilinear-quadratischen Problems. In diesem Beitrag wird das Problem mit endlicher Vorgangsdauer näher untersucht. Vorgestellt wird ein Iterationsverfahren, welches sich an dem aus der Theorie der linearen Systeme bekannten Riccati-Formalismus orientiert. Als Ergebnis wird eine Folge von modifizierten Riccati-Reglern erhalten. Auf ein Beispiel aus der chemischen Verfahrenstechnik wird das Verfahren angewandt und numerische Ergebnisse werden präsentiert.

## B. Jakubczyk: Geometry of Nonlinear Discrete-Time Systems

In general, nonlinear discrete-time systems are less understood than the continuous-time systems. In this lecture we introduce geometric objects attached to any discrete-time system which should provide a tool for its geometric analysis. These objects are distributions which generalize the notion of the Kalman controllability subspaces to the nonlinear case. We give criteria in terms of these distributions which allow to determine whether a given system can be linearized via a change of state coordinates and a feedback (this result was obtained together with J. Grizzle). We also define a rank of the nonlinear system which is a generalization of Kalman's rank. We show that it is responsible for the accessibility of the system.

T. Kaczorek: Two-Dimensional Linear Systems with Variable Coefficients

A new definition of the transition matrix for a general two-dimensional (2-D) system with variable coefficients is presented. The general response formula for the general 2-D system model with variable coefficients is derived. Solutions to the Roesser's model and to the first and the second Fornasini-Marchesini's models with variable coefficients are also given. Necessary and sufficient conditions for local controllability and observability are established. The minimum energy control problem for Roesser's model with variable coefficients is formulated and solved. Sufficient conditions are given for the existence of a solution to the dead-beat control for Roesser's model with variable coefficients.

G. Kern: Zum robusten Stabilisierungsproblem von linearen periodischen Systemen

Das Stabilisierungsproblem von linearen periodischen Kontrollsystemen kann unter Verwendung der Floquet-Theorie als ein inverses Eigenwertproblem formuliert werden. Existiert im mehrdimensionalen Fall eine Lösung, dann ist diese nicht eindeutig und die ungenutzten Freiheitsgrade können dazu verwendet werden, zusätzliche Bedingungen an das System zu stellen. Dies geschieht in der Form, daß eine Minimierung der Sensitivität der Eigenwerte in bezug auf Störungen am System gefordert wird.

Es wird zuerst eine notwendige und hinreichende Bedingung für das Stabilisierungsproblem bei periodischen Systemen angegeben, weiters eine notwendige Bedingung für die Lösung des robusten

Problems, u.z. in der Form, daß der zu einem vorgegebenen charakteristischen Exponent des geschlossenen Systems gehörende Eigenvektor einem festgesetzten Raum  $S_j$  angehören muß. Als Konditionierungsmaß wird die Konditionszahl  $\kappa_2(x) = \|X\|_2 \cdot \|x^{-1}\|_2$  der Matrix der Eigenvektoren  $X = [x_1, \dots, x_n]$  gewählt, die ihr Min.,  $\kappa_2(x) = 1$ , annimmt, wenn  $X$  unitär ist. Aus der Forderung, daß  $x_j \in S_j$  sein muß und andererseits so orthogonal, als möglich zu den restlichen Vektoren  $x_i \neq x_j$ ,  $i = 1, \dots, n$  sein soll, wird ein Algorithmus angegeben, der  $\kappa_2(X)$  minimiert. Weiters wird die max. zulässige Störung, damit das Stabilitätsverhalten erhalten bleibt, in Abhängigkeit der Konditionszahl angegeben.

W. Krabs: On the Application of Galerkin's Method to Time-Optimal Control Problems

We consider a process of vibration being described by an abstract wave equation of the form

$$\ddot{y}(t) + Ay(t) = f(t) \quad , \quad t \in (0, T) \quad , \quad (1)$$

where  $A$  is a selfadjoint positive definite linear operator defined on a dense subspace  $D(A)$  of a Hilbert space  $H$  and  $f \in L^2([0, T], H)$ . Given an initial state

$$y(0) = y_0 \in D(A^{1/2}) \quad \text{and} \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \in H \quad (2)$$

and some constant  $M > 0$  we consider the problem of finding a "control"  $f \in L^2([0, T], H)$  with

$$\|f\|_T = \left( \int_0^T \|f(t)\|_H^2 dt \right)^{1/2} \leq M$$

such that

$$y(T) = \dot{y}(T) = 0$$

where  $y: [0, T] \rightarrow D(A^{1/2})$  is the corresponding weak solution of (1), (2) and  $T$  is as small as possible. It is shown how this problem can be solved by using Galerkin's method and convergence statements are presented along with numerical results for a vibrating rectangular plate.

#### K. Kunisch: Approximation of the Linear Quadratic Problem for Parabolic Systems

A general framework for approximation of the infinite horizon LQ problem is discussed which includes as special applications Galerkin approximations to second order parabolic partial differential equations. For the finite horizon problem, in addition, rate of convergence estimates for the Riccati operator, the optimal control and the optimal trajectory can be obtained.

#### H. Kwakernaak: A Polynomial Approach to $H_\infty$ -Optimization

Many design problems for finite-dimensional linear time-invariant control systems can be converted to the minimization of the  $\infty$ -norm of an affine expression in a variable that takes its values in  $H_\infty$ . It is shown how this problem can be reduced to determining a special solution of a pair of polynomial matrix equations.

#### M. Mansour: On Model Reduction of Discrete Time Systems

A further justification of model reduction by Badreddin-Mansour's method is presented. In particular connections between polynomial

root location properties, coefficient properties and Schur-Cohn coefficient properties are established. A lattice realization of discrete systems in canonical forms as well as a realization of the reduced model is given. Furthermore, certain relationships between the original model and its reduced form are obtained. These relationships give insight into the validity of the method of reduction and present information on the order of approximation. This work was done together with Brian Anderson and Eli Jury.

P.C. Müller: Analyse des dynamischen Verhaltens von Regelungssystemen mit Zweipunktgliedern

Es wird der Einfluß von nichtlinearen Rückführungen, die als Zwei- oder Dreipunktglieder mit oder ohne Totzone sowie mit oder ohne Hysterese zugelassen sind, auf das Bewegungsverhalten linearer Mehrgrößenregelungssysteme analysiert. Drei Effekte stehen dabei im Mittelpunkt: (i) Grenzzykel bei stückweise konstanten Eingangsgrößen, (ii) Gleitbewegungen, (iii) Grenzzykel mit Gleitstücken. Im Fall (i) werden Grenzzykel berechnet und ihre Stabilität aufgrund einer Modifikation des Stabilitätssatzes von Andronov und Witt untersucht. Im Fall (ii) werden die Gleitbewegungen ermittelt und das Stabilitätsverhalten mittels der Übertragungsnullstellen des linearen Systems beurteilt. Bei einem Regelkreisentwurf gemäß einer Verallgemeinerung des Vorgehens von Kalman und Bertram kann asymptotische Stabilität nachgewiesen werden. Der Fall (iii) wird ebenfalls analysiert und dabei auf seine Bedeutung für die Positionsregelung von Robotern hingewiesen, wenn Gleit-Haft-Reibung an den Antriebsmotoren berücksichtigt wird.

G.Y. Olsder: Discrete-Event Dynamic Systems

Recently an analogy between conventional system theory and the relatively new theory on discrete-event dynamic systems has been shown to exist. The system description in the new theory resembles the one of the conventional theory provided that the operations addition and multiplication are replaced by maximization and addition respectively. One also speaks about systems in the max-algebra, which is a semi-ring. In this talk we investigate minimal realization theory for discrete-event dynamic systems. It turns out that the characteristic equation of a matrix in the max-algebra (to be defined) plays a crucial role. The theorem of Cayley-Hamilton in the new set-up can also be proved.

P. Ronge: Optimale nichtlineare Zustandsrückführung mit Beobachter

Im Gegensatz zum ziemlich ausgereiften Gebiet der "modernen" linearen Regelungstheorie ist die Theorie nichtlinearer Zustandsraumdarstellung noch in der Entwicklung begriffen. Verschiedene - meist auf Zustandsrückführung beruhende - Entwurfsverfahren sind vorgeschlagen worden, wobei das auf der Taylorreihenentwicklung (TRE) der Optimalregelung basierende am erfolgversprechendsten für Festwertregelungen zu sein scheint. - Auf der TRE aufbauende nichtlineare (Zustands-)Schätzmethoden sind ebenfalls bekannt. Leider gilt das Separationsprinzip im nichtlinearen Fall nicht; deshalb muß das Beobachterproblem die nichtlineare Rückführung der Schätzwerte enthalten. Im Vortrag wird die Erweiterung des TRE-Ansatzes auf die optimale nichtlineare Zustandsrückführung incl. Beobachter behandelt. Dazu werden die Momente des erweiterten Zustandes sowie die zugehörigen adjungierten Momente in eine Taylorreihe entwickelt. Daraus kann der Gradient bzgl. der gesuchten Koeffizienten abgeleitet werden. Unter der Annahme von schwachem Rauschen

können die Koeffizienten durch die rekursive Lösung von linearen Gleichungssystemen bestimmt werden. Verschiedene Entwurfsverfahren - optimale und suboptimale - mit unterschiedlichem numerischen Aufwand werden damit ermöglicht. Ein numerisches Beispiel zeigt die Robustheitseigenschaften der mit diesen Methoden entworfenen Regler im Vergleich zu bisher bekannten Ansätzen.

A.J. van der Schaft: Geometric Control Theory for Nonlinear Mechanical Systems

Apart from studying nonlinear systems in general it is of interest to study nonlinear systems with special structure. On the one hand general nonlinear systems are too difficult for many control purposes (e.g. nonlinear stability), while on the other hand one would like to relate control strategies with the structure of the system. A physically well-motivated class of nonlinear systems with special structure are the Hamiltonian systems. They serve as a natural starting point in the description of many physical systems, e.g. robot manipulators and mechanical structures. In this talk a survey is given of some results concerning stabilizability, invertibility and decoupling.

G. Stefani: Nilpotent Approximations of a Control System

Let

$$\begin{cases} \dot{x} = f_0(x) + \sum_{i=1}^m u_i f_i(x) \\ x(0) = 0 \end{cases}$$

be a  $C^\infty$  control system.

A method to get a nilpotent polynomial approximation is given. First, using the properties of the Lie Algebra generated by the  $f_i$ 's, a suitable coordinate system is defined. Then a graded structure on  $\mathbb{R}^n$  is defined by means of the new coordinate system. The approximating system is defined as "the first significant approximation with respect to the graded structure". If the approximating system is locally controllable, then the minimum time map of the original system has the Hölder property with exponent  $1/r$ , for a suitable integer  $r$  depending on the properties of the Lie Algebra generated by the  $f_i$ 's.

B. Tibken: Zum bilinear-quadratischen Problem mit endlicher Vorgangsdauer

Der Reglerentwurf für bilineare Systeme auf der Basis eines quadratischen Kriteriums führt auf ein nichtlineares Randwertproblem. Dieses wird durch eine Folge linearer zeitvarianter Probleme iterativ gelöst. Im vorliegenden Beitrag wird die Konvergenz dieses Iterationsverfahrens untersucht. Hierzu wird das Verfahren mit Hilfe von Operatoren in Banachräumen formuliert. Es wird gezeigt, daß unter gewissen Voraussetzungen diese Operatoren eine kontrahierende Abbildung definieren, welche die Konvergenz des Verfahrens sicherstellt und Bedingungen für die frei wählbaren Parameter des Reglerentwurfs liefert. An einem numerischen Beispiel wird die Konvergenz des Verfahrens demonstriert.

H. Tolle: Über weitere Untersuchungen zu lernenden Regelkreisen

1984 wurde in Oberwolfach über ein Regelkreiskonzept vorgetragen, das es gestattet zu nichtlinearen Strecken gezielt nichtlineare



Regler aufzubauen, die im Sinne eines vorgebbaren Gütekriteriums optimal sind. Grundbaustein ist ein an Vorstellungen über die Speicherung von Informationen in Nervennetzen orientierter, lokal verallgemeinernder assoziativer Speicher, in dem ein prädiktives Prozeßmodell zur Prüfung der Optimalität der Stellaktionen und der sich so ergebende Satz von optimalen Stellaktionen abgelegt wird. Es wurde nun über die Effekte einiger Weiterentwicklungen des Konzeptes, wie die Variation der lokalen Verallgemeinerung während des Lernprozesses, die Vorgabe einer Reglerstruktur mit assoziativer Speicherung der Reglerparameter und eine Vereinfachung des lernenden Regelkreises berichtet.

#### G. Vossius: Untersuchungen über den Einsatz der Rechenbergschen Evolutionsstrategie als Regelalgorithmus in der funktionellen Stimulation

Das Arm-Hand-System weist mehr als 40 Freiheitsgrade auf mit 27 Gelenken, die von etwa 50 Muskeln kontrolliert werden. Jeweils mehrere Muskeln wirken gemeinsam auf einen Freiheitsgrad, es bestehen also zahlreiche Verkopplungen, außerdem eine ganze Reihe Nichtlinearitäten.

Bei hoher Querschnittslähmung, die eine Tetraplegie zur Folge hat, sind Arm und Hand mehr oder weniger gelähmt, d.h. der willkürlichen Kontrolle entzogen, während die Nervenverbindungen vom Rückenmark zu den Muskeln noch intakt sein können. In diesen Fällen kann man versuchen, durch mehrkanalige elektrische Aktivierung ausgewählter Muskeln gewisse Funktionen wieder herzustellen, z.B. einen Griff. Für die Erzeugung einfacher Bewegungen können die Reizkombinationen programmiert werden. Für die Durchführung umfangreicher Bewegungsabläufe müssen diese u.U. geregelt erfolgen. Auf der Basis parametrischer Modelle ist dies nur mit großem Aufwand möglich. Deshalb wurde die Einsatzmöglichkeit von zufälligen Suchverfahren als Regelalgorithmus überprüft. Es wurde die eingliedrige Rechenbergische Evolutions-

strategie als unter diesen Bedingungen günstig gewählt. Theoretische und praktische experimentelle Untersuchungen, auch am Menschen, zeigten, daß die Strategie für eine realistische Zahl von Stimulationskanälen, z.B. 8, praktisch einsetzbar ist und zu guten Ergebnissen führt. Ein Vorteil des Verfahrens besteht auch darin, daß sich Randbedingungen und der Lernzuwachs gut in die Strategie einbinden lassen, die Bewegungsführung verbessern und die benötigte Rechenzeit verringern.

#### K. Wagner: Local Controllability of Nonlinear Systems

A new, generalized concept of a cone of attainability (the classical one being due to Pontryagin) is presented in order to study the reachable set for nonlinear control systems. The maximal linear subspace  $L$  of this cone exhibits an invariance property analogous to the well-known one of the controllability subspace of a linear system, of which  $L$  is in fact a "nonlinear generalization". It is demonstrated that some well-known first and second order conditions for optimality correspond to sufficient conditions for local controllability. Also, some new third order conditions for local controllability are presented.

Berichter: A. Munack

Tagungsteilnehmer

J. Ackermann  
DFVLR

8031 Oberpfaffenhofen

D.P. Atherton  
School of Engineering and Applied  
Sciences/University of Sussex  
Falmer, Brighton BN1 9QT  
England

R.M. Bianchini  
Istituto Matematici  
U. Dimi - Viale Magagni 67/A  
I - 50134 Firenze  
Italien

C. Corduneanu  
Department of Mathematics  
University of Texas  
Arlington Tx 76019  
USA

N. Dourdoumas  
Theorie d. Automatisierungssysteme  
Universität-GH-Paderborn; FB 14  
Pohlweg 47 - 49

D-4790 Paderborn

M. Fliess  
Laboratoire des Signaux et Systèmes  
C.N.R.S.-E.S.E.  
Plateau du Moulou  
F-91190 Gif-sur-Yvette  
Frankreich

D. Franke  
Universität d. Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85

D-2000 Hamburg 70

M.L.J. Hautus  
Dept. of Math. & Comp. Sci.  
University of Technology  
Eindhoven  
The Netherlands

D. Hinrichsen  
Fachbereich 3 (Mathematik)  
Universität Bremen  
Bibliothekstraße

D-2800 Bremen 33

E.P. Hofer  
Arbeitsbereich Regelungstechnik  
und Systemdynamik  
TU Hamburg-Harburg  
Eißendorfer Straße 38  
2100 Hamburg 90

A. Isidori  
Dept. of Informatica e Sistemistica  
Universita di Roma  
Via Eudossiana 18  
I-00184 Rome  
Italy

B. Jakubczyk  
Institute of Mathematics  
Polish Academy of Sciences  
PL-00-950 Warsaw, Sniadeckich 8

T. Kaczorek  
Ruhr-Universität Bochum  
L.Elektr.Steuer.Regel. IC/3.Z.56  
Postfach 10 21 48  
D-4630 Bochum 1

K. Kunisch  
Institut für Mathematik der  
Technischen Universität  
Kopernikusgasse 24

A-8010 Graz

F. Kappel  
Institut für Mathematik  
Universität Graz  
Elisabethstraße 16  
A-8010 Graz

H. Kwakernaak  
Dept. of Appl. Math.  
Twente Univ. of Technology  
P.O. Box 217  
NL 7500 AE Enschede  
The Netherlands

G. Kern  
Institut für Mathematik  
TU Graz  
Kopernikusgasse 24  
A-8010 Graz

M. Mansour  
Fachgruppe f. Automatik  
ETH-Zentrum  
CH-8092 Zürich

H.W. Knobloch  
Mathematisches Institut  
Am Hubland  
D-8700 Würzburg

P.C. Müller  
Sich., Regelungs- u. Meßtechnik  
Bergische Univ.-GH Wuppertal  
Gaußstraße 20

D-5600 Wuppertal 1

W. Krabs  
Fachbereich Mathematik  
der TH Darmstadt  
Schloßgartenstraße 7

A. Munack  
Arbeitsbereich Regelungstechnik  
TU Hamburg-Harburg  
Eißendorfer Straße 38

D-6100 Darmstadt

2100 Hamburg 90

V. Krebs  
TU Clausthal, Institut für  
Elektrische Informationstechnik  
Leibnizstraße 28

H. Nour Eldin  
Automatisierungstechnik und  
Technische Kybernetik  
Bergische Universität - GH  
Fuhlrottstraße 10

D-3392 Clausthal-Zellerfeld

D-5600 Wuppertal

G.I. Olsder  
Dept. of Math. and Informatics  
Delft University of Technology  
P.O. Box 356  
NL-2600 AJ Delft  
The Netherlands

B. Tibken  
Arbeitsbereich Regelungstechnik  
TU Hamburg-Harburg  
Eißendorfer Straße 38  
D-2100 Hamburg 90

R. Reißig  
Institut für Mathematik  
Ruhr Universität  
Universitätsstraße 150  
D-4630 Bochum 1

H. Tolle  
T.H. Darmstadt  
Institut für Regelungstechnik  
Fachgebiet Regelungstheorie  
Schloßgraben 1  
D-6100 Darmstadt

P. Ronge  
Institut für Regelungstechnik  
Universität Hannover  
Appelstraße 11  
D-3000 Hannover 1

I. Troch  
TU Wien  
Karlsplatz 13  
A-1040 Wien

A.J. van der Schaft  
Dept. of Applied Mathematics  
Twente Univ. of Technology  
P.O. Box 217  
NL-7500 AE Enschede  
The Netherlands

G. Vossius  
Institut für Biokybernetik  
u. Biomedizinische Technik  
Universität Karlsruhe  
Kaiserstraße 12  
D-7500 Karlsruhe 1

H. Schwarz  
Meß-Steuer-Regelungstechnik  
Uni-GH-Duisburg  
Lotharstraße  
D-4100 Duisburg 1

K. Wagner  
Mathematisches Institut  
Am Hubland  
D-8700 Würzburg

G. Stefani  
Dipart. Sistemi e Informatica  
Via di Santa Marta 3  
I-50139 Firenze  
Italia

11  
12  
13

