MATHEMATISCHES FORSCHUNGSINSTITUT OBERWOLFACH

T a g u n g s b e r i c h t 12/1976

Regelungstheorie

14.3. bis 20.3.1976

Die diesjährige Tagung über Regelungstheorie wurde von H. W. Knobloch (Würzburg) und M. Thoma (Hannover) geleitet. Bei 34 teilnehmenden Mathematikern und Ingenieuren wurden insgesamt 21 Vorträge gehalten. Gemäß der Zielsetzung der Tagung waren die Vorträge teilweise mehr theoretisch- und teilweise mehr anwendungsorientiert.

Die Mehrzahl der Beiträge war der linearen deterministischen Regelungstheorie für Systeme mit konzentrierten Parametern gewidmet, wobei insbesondere neben allgemeinen systemtheoretischen Darstellungen Probleme der Identifizierung und Beobachtung, Stabilitätsuntersuchungen sowie Syntheseaufgaben im Vordergrund standen. Einige Vortragende gingen in diesem Zusammenhang auch auf Systeme mit verteilten Parametern ein.

Ein weiterer Schwerpunkt lag bei den optimalen Systemen. Hier wurden vor allem Differentialspiele, Anwendungen des Maximumprinzips bei singulären Steuerungen, Funktionale und Funktionalgleichungen mit nacheilendem Argument sowie der Entwurf suboptimaler diskreter Steuerungen mit Hilfe der Dynamischen Programmierung behandelt.

Eine Reihe von Vortragenden beschäftigte sich mit speziellen Problemen bei nichtlinearen Systemen. Das Hauptaugenmerk war dabei auf Stabilitätsuntersuchungen und auf die Ermittlung periodischer Lösungen gerichtet.

Relativ wenig Aufmerksamkeit fanden stochastische Systeme. Dies mag zufällig gewesen sein, muß aber dennoch bedauert werden, da gerade auf diesem Gebiet derzeit international gesehen ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt festzustellen ist.

Neben den aufgeführten Themenkreisen, bei denen vorwiegend analytische Lösungen bzw. Lösungswege im Mittelpunkt standen, waren zahlreiche Vorträge auch numerischen Fragestellungen gewidmet. Dies ist bemerkenswert, da dieses wichtige Gebiet der Regelungstheorie in der Vergangenheit häufig etwas vernachlässigt wurde. Insbesondere wurden hier behandelt Lösungsverfahren für Eigenwertaufgaben hoher Ordnung, die Berechnung von Transitionsmatrizen sowie die iterative Lösung von nichtlinearen Optimierungsaufgaben.

Als Fazit kann man auch diesmal der Tagung über Regelungstheorie einen bemerkenswerten Erfolg bescheinigen, der bereits kurzfristig bei den zahlreichen und ausführlichen Diskussionen während der Fachsitzungen und bei den Gesprächen am Rande der Tagung sichtbar wurde.

<u>Teilnehmer</u>

L. Arnold, Bremen
Bahman-Mehri, Hamburg
R.S. Bucy, Berlin
H. Burkhardt, Karlsruhe
F. Csâki, Budapest
N. Dourdoumas, Graz
E. Freund, Karlsruhe
H. Hahn, Tübingen
W. Hahn, Graz
M. Hayase, Hannover
F. Kappel, Graz
S. Kitamura, Stuttgart
H.W. Knobloch, Würzburg
M. Köhne, Stuttgart
R.P. Königs, Würzburg
H. Kwakernaak, Enschede
J. Lückel, Stuttgart
R. Lunderstädt, Hamburg
M. Mansour, Zürich
F. Mesch, Karlsruhe
K. Nixdorff, Hamburg
P.C. Müller, München
H.A. Nour Eldin, Zürich
G.J. Olsder, Enschede
G. Reißig, Bochum
R. Reißig, Bochum
P. Sagirow, Stuttgart
G. Schneider, Graz
H. Schwarz, Duisburg
M. Thoma, Hannover
H. Tolle, Darmstadt
I. Troch, Wien
A.P. Wierzbicki, Warschau
J.C. Willems, Groningen

Vortragsauszüge

P. C. MÜLLER: Zur Theorie der Störgrößenkompensation in Meßgrößenregelsystemen

Die Unterdrückung von Störungen in Eingrößenregelsystemen durch Störgrößenaufschaltung wird auf lineare, zeitinvariante Meßgrößensysteme erweitert. Zuerst wird die in den letzten Jahren entwickelte Theorie dieser Störgrößenkompensation deterministischer Störungen dargestellt, wobei die verschiedenen Schreibweisen (geometrische; matrizielle) vergleichend gegenübergestellt werden. Hierbei sind zwei Schritte zu unterscheiden:

(i) Existenzbedingungen,
(ii) Entwurfsalgorithmen.

Als weitere Frage ist die Unempfindlichkeit der Störgrößenkompensation gegenüber Parameterschwankungen zu berücksichtigen. Hierbei stellt sich das Problem des Entwurfs eines unempfindlichen Beobachters als das schwierigste heraus. Auf diese Schwierigkeiten wird eingegangen.

J. LÜCKEL: Maßzahlen für Strukturkriterien von Regelsystemen und ihre Anwendung auf die Analyse von Parameterempfindlichkeiten

Die Analyse und Synthese von Mehrgrößenregelsystemen kann in der praktischen Anwendung nur mit Hilfe der numerischen Mathematik und der digitalen Rechentechnik durchgeführt werden. Im Mittelpunkt einer systematischen Untersuchung steht dabei die numerische Lösung der allgemeinen Eigenwertaufgabe. Es wird untersucht, welche Bedeutung für Kontrollrechnungen Konditionszahlen haben. Es zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen den numerischen Problemen bei der Definition einer Kontrollzahl und entsprechenden physikalisch definierten Parameterempfindlichkeiten.

Eine andere Möglichkeit für die Ableitung von algebraischen Maßen für Parameterempfindlichkeiten ergibt sich aus einer regelungstechnischen Betrachtung. Für eine eingehende Analyse von Mehrgrößenregelproblemen wurden algebraische Strukturkriterien formuliert, die eine quantitative Aussage über die Steuerbarkeit, Beobachtbarkeit und Störbarkeit liefern. Es wird ein Vorschlag gemacht, ein ähnliches Maß für die Analyse von Parameterempfindlichkeiten einzusetzen.

M. KÖHNE: Theorie der Zustandsbeobachter mit verteilten Parametern

Die von LUENBERGER entwickelte Theorie der Zustandsbeobachter für lineare deterministische Systeme mit konzentrierten Parametern wird auf örtlich verteilte Systeme mit mehreren Zustandsvariablen ausgedehnt. Aus der angegebenen Definition des asymptotischen Beobachters reduzierter Ordnung werden Bedingungen für die Beobachtersynthese abgeleitet. Zwei Sonderfälle, die Beobachter

(i) vollständiger,
(ii) minimaler

Ordnung werden diskutiert und anhand zweier Beispiele erläutert. Des weiteren wird die Verwendung eines Beobachters im geschlossenen Regelkreis untersucht. Die abgeleiteten theoretischen Ergebnisse bilden die Grundlage für zukünftige Anwendungen.

F. CSÁKI: <u>Die Rolle der abgebrochenen Polynome in einigen Anwendungen der Zustandsraum-Methode</u>

Nach einer einführenden Erläuterung und Definition der abbegrochenen Polynome werden einige Anwendungsmöglichkeiten dargestellt. Insbesondere wird hingewiesen auf die Berechnung der

(i) Transitionsmatrix,
(ii) kanonischen Transformationsmatrix und ihrer Inversen,
(iii) Vandermonde Matrix und ihrer Inversen.

Für alle Anwendungen werden geschlossene analytische Ergebnisse vorgelegt. Diese werden diskutiert und mit anderen Berechnungsverfahren verglichen.

H. A. NOUR ELDIN: <u>Realisierung in Hessenberg-Form für die Übertragungsfunktionsmatrix</u>

Der Übergang von der Beschreibung eines linearen Prozesses durch die Übertragungsfunktionsmatrix g(p) bzw. g(z) auf die Zustandsdarstellung (A, B, C) führt auf das minimale Realisierungsproblem. Dieses Problem wurde bis jetzt durch direkte oder indirekte Anwendung von Hankelmatrizen oder Steuerbarkeits- bzw. Beobachtbarkeitsmatrizen verschiedentlich behandelt. Das hier angegebene Verfahren weicht bewußt von diesem bisher verwendeten Wege ab, um ein Realisierungsverfahren zu erreichen, das nur numerisch stabile Transformationen verwendet. Ein wesentliches Merkmal der erreichten Realisierung ($\tilde{A}$, $\tilde{B}$, $\tilde{C}$) ist, daß die Zustandsmatrix $\tilde{A}$ eine für die Polfestlegung, den Beobachterentwurf und die Steuerbarkeitsprüfung verwendete Hessenberg-Form aufweist. Die gezielte Realisierung in dieser Form zeichnet sich sowohl durch Einfachheit als auch durch numerische Stabilität aus und wurde auf zahlreiche Prozesse aus der regelungstechnischen Literatur zuverlässig angewendet.

- 6 -

R. S. BUCY: Periodische Regelprobleme

Es werden lineare Systeme in Hamiltonscher Form betrachtet, die über periodische Lösungen verfügen. Die Beschreibung erfolgt in Matrixdarstellung. Als Beispiel hierzu wird das Problem von Hill aus der Himmelsmechanik genannt.

Zunächst wird eine Erklärung der charakteristischen Exponenten und der Floquetschen Theorie in Anwendung auf Matrizen gegeben. Dann werden Bezüge zu dem periodischen linearen Regelungsproblem mit quadratischem Güteindex hergestellt. Es wird gezeigt, daß sich die Lösung des Problems aus einer Riccati-Matrixdifferentialgleichung mit periodischen Koeffizienten ergibt.

Abschließend wird nachgewiesen, daß die abgeleiteten Ergebnisse Verallgemeinerungen der Methode von Bruns aus der Himmelsmechanik darstellen.

M. HAYASE: Geometrische Eigenschaften der Lösungen der Riccati-Matrizengleichungen

Die kontinuierlichen und diskreten Riccati-Matrizengleichungen werden im $n(n+1)/2$ dimensionalen Raum untersucht. Es ergeben sich dabei folgende Ergebnisse:

1) $\pi(t, F, t_f)$ sei die Lösung einer Riccati-Gleichung mit dem Randwert F zu t_f. Dann gilt im Intervall $[t_c, t_f]$ Inertia $[\pi(t, F_1, t_f) - \pi(t, F_2 t_f)]$ = Inertia $[F_1-F_2]$, wobei Inertia $[X]$ durch (π, γ, δ) bestimmt ist; π, γ geben die Anzahl der positiven und negativen Eigenwerte der Matrix X an und δ sind die restlichen Null-Eigenwerte; $[t_c, t_f]$

ist das Intervall, in dem die Lösung des originalen Optimierungsproblems existiert.

2) Notwendige und hinreichende Bedingung der Nichtexistenz von t_c im Intervall $[-\infty, t_f]$ ist $F > P_-$, wobei P_- eine Lösung der algebraischen Riccati-Gleichung ist. Für die kontinuierliche Riccati-Gleichung muß P_- die Bedingung $\mathrm{Re}\,\lambda(A-BR^{-1}B^TP_-) > 0$ erfüllen. Im diskreten Fall ergibt sich für P_- eine äquivalente Bedingung, da alle Eigenwerte der Matrix $[A-BR^{-1}B^T(P_-^{-1}+BR^{-1}B^T)^{-1}A]$ außerhalb des Einheitskreises liegen müssen.

G. J. OLSDER: Informationsstrukturen für Differentialspiele

Um ein Nichtnullsummendifferentialspiel zu definieren, braucht man die folgenden Bestandteile: ein Modell oder System, eine Kostenfunktion für jeden Spieler, einen Lösungsbegriff (hier nur den Nash Lösungsbegriff) und eine Informationsstruktur. Grob gesagt definiert eine Informationsstruktur die Abhängigkeit der optimalen Steuerungen oder Strategien vom Zustandsvektor des Systems. Anhand eines einfachen Beispiels werden achtzehn verschiedene Informationsstrukturen behandelt (u.a. open- und closed-loop, Stackelberg). Rekursive Beziehungen für die Lösungen von linear-quadratischen Problemen werden für fünf wichtige Strukturen angegeben. Zusätzlich werden Existenz und Eindeutigkeit betrachtet. Schließlich werden noch zwei besondere Strukturen angegeben: eine, bei der einer der beiden Spieler eine Zeitverzögerung bei seinen Beobachtungen hat und eine, bei der einer der beiden Spieler seine Strategie k Zeitschritte vorher bekannt machen muß.

H. W. KNOBLOCH: Maximum-Prinzipien höherer Ordnung

Es geht um die Möglichkeit, optimale Lösungen von Kontrollproblemen, welche durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschrieben werden, mit Hilfe von notwendigen Bedingungen "höherer Ordnung" zu charakterisieren. In der Literatur spielen solche Bedingungen vor allem eine Rolle im Zusammenhang mit sogenannten "singulären Extremalen". Diese Bedingungen gelten zusätzlich zum Pontryaginschen Maximum-Prinzip und haben die Form einer Multiplikatorenregel: Für einen passend gewählten adjungierten Zustandsvektor $y(\cdot)$ gilt das Pontryaginsche Maximum-Prinzip und es bestehen darüber hinaus Relationen der Form $y(t)^T p \leq 0$, für alle $p \in \pi_t$; π_t ist dabei eine gewisse von t abhängige Menge von Vektoren. In dem Vortrag wird ein neues allgemeines Prinzip zur Konstruktion solcher Mengen π_t vorgestellt. Mit diesem Prinzip lassen sich nicht nur die heute bekannten Bedingungen höherer Ordnung begründen, sondern auch neue Anwendungen, z.B. auf "partiell singuläre" Lösungen herleiten.

F. KAPPEL: Transformationshalbgruppen und Optimal Control

Für Systeme, deren Dynamik durch Funktional-Differentialgleichungen beschrieben wird, werden zur numerischen Behandlung von Optimierungsaufgaben Methoden vorgeschlagen, die Approximationsresultate für Transformationshalbgruppen benutzen (Trotter-Kato-Theorem). Grundlage ist eine Approximation der Systemgleichungen durch gewöhnliche Differentialgleichungen, wodurch das unendlichdimensionale Ausgangsproblem auf endlichdimensionale approximierende Probleme zurückgeführt wird. Die approximierenden Probleme werden mit Standardverfahren behandelt. Das Verfahren wird für lineare, zeitunabhängige Systemgleichungen mit quadratischem Kostenfunktional erläutert, wobei die Zustandsgröße durch Treppenfunktionen approximiert wird. Dieser Fall wurde bereits durch Banks und Burns behandelt. Abschließend wird ein Ausblick auf nichtlineare, zeitabhängige Systeme sowie auf Systeme mit unendlicher Nacheilung gegeben.

G. SCHNEIDER: <u>Über die Synthese von Regelkreisen mit beschränkten Systemgrößen</u>

Es werden zwei Verfahren angegeben:

Das erste bezieht sich auf lineare, zeitinvariante Systeme und stellt eine Erweiterung des bekannten Frequenzkennlinienverfahrens dar. Dabei werden Ungleichungen im Zeitbereich in Ungleichungen im Frequenzbereich überführt, wodurch man notwendige Bedingungen für die Übertragungsfunktionen der Korrekturglieder erhält.

Beim zweiten Verfahren werden die durch dynamische Programmierung gefundenen Kostenfunktionen bzw. Regelgesetze in Anlehnung an das Vorgehen von Boudarel et al. durch im weiteren Sinne orthogonale Polynome approximiert. Es erscheint die Hoffnung nicht unbegründet, daß man auf diese Weise die Methode der dynamischen Programmierung zur Synthese praktisch verwendbarer suboptimaler Regler für nichtlineare Regelstrecken nicht zu hoher Ordnung heranziehen kann.

M. MANSOUR: <u>Schwarz-Matrix für diskrete Systeme</u>

Es erfolgt zunächst ein historischer Überblick über die verschiedenen Stabilitätsbedingungen für kontinuierliche und diskrete lineare Systeme. Dann wird gezeigt, wie die Schwarz-

Matrix zur Stabilitätsuntersuchung kontinuierlicher Systeme verwendet werden kann. In diesem Zusammenhang wird auf Bezüge zu Arbeiten von Kalman und Bertram verwiesen. Ausgehend von dem Schur-Cohn-Kriterium wird schließlich nachgewiesen, daß eine zu der Schwarz-Matrix analoge Matrix angegeben werden kann, die zur Stabilitätsuntersuchung diskreter Systeme geeignet ist. Insbesondere ist es damit möglich, die Wurzelverteilung von vorgegebenen Polynomen relativ zum Einheitskreis zu untersuchen.

I. TROCH: Duale Eigenschaften bei zeitvariablen, linearen Mehrgrößensystemen mit Anwendung auf das Inversionsproblem

Den Betrachtungen werden lineare, zeitvariante Mehrgrößensysteme mit und ohne direkter Übertragung in Zustandsraumdarstellung zugrundegelegt, wobei insbesondere Eingangs- und Ausgangsvektor unterschiedliche Dimension aufweisen können. Zunächst werden Dualitätsaussagen hinsichtlich Zustandssteuerbarkeit und -beobachtbarkeit für spezielle Eingangsfunktionen (Sprungfunktionen, Impulse), bzw. spezielle Ausgangsmessungen (Abtastung, Integration) angegeben und diese dann auf das Problem der Ausgangssteuerbarkeit bzw. der Bestimmbarkeit bestimmter Eingangsfunktionen erweitert. Abschließend werden Kriterien für die Ausgangsfunktionssteuerbarkeit, bzw. die Eingangsfunktionsbestimmbarkeit angegeben, wobei eine wesentliche Abhängigkeit der Form dieser Kriterien vom Typ der betrachteten Funktionen (etwa, ob singuläre Distributionen zugelassen werden) festgestellt wird.

H. HAHN: Zum Problem der praktischen Stabilität

Es wird untersucht, unter welchen Bedingungen lokal instabile Systeme (z.B. nichtlineare Regelkreise) praktisch stabil sind.

Die Grundidee dieser Untersuchungen besteht darin, eine Beziehung zwischen dem Problem der praktischen Stabilität und dem Problem der Verzweigung spezieller Lösungen des Systemoperators herzustellen. Diese Idee wird zunächst - ausgehend von einem Beispiel - heuristisch motiviert und beleuchtet und dann im Rahmen einer modifizierten Bifurkationstheorie (Ljapunow und Schmidt) formal abgehandelt. Die theoretischen Ergebnisse werden anhand einer Vielzahl verschiedener nichtlinearer Regelkreise beispielhaft erläutert. Alle Beispiele wurden vollständig numerisch durchgerechnet.

R. P. KÖNIGS: <u>Nullsteuerbarkeitsbereiche bei ebenen autonomen Kontrollproblemen mit Phaseneinschränkung</u>

Betrachtet werden Systeme der Form

$$(S)\qquad \begin{aligned} \dot v &= a(v, w) \\ \dot w &= b(v, w) + u \cdot c(v, w) \end{aligned}$$

(z.B. Bushaw-Problem, Duffing'sche Dgl. mit Steuerung, van-der-Pol'sche Dgl. mit Steuerung) mit einer Phaseneinschränkung $\gamma(v, w) \leq 0$. Untersucht wird die Menge der Punkte, die in endlicher Zeit mit stückweise stetiger Steuerfunktion $u(t) \in \langle -1, 1 \rangle$ in eine Ruhelage im Punkt (O, O) gesteuert werden können (Nullsteuerbarkeitsbereich = NSB). Ist der NSB für das Problem ohne Beschränkung einfach zusammenhängend, so gilt für das Problem mit Zustandsbeschränkung:

Der Rand des NSB ist eine einfache Kurve bestehend aus Trajektorienstücken von (S) mit bang-bang Steuerung und aus Abschnitten, auf denen $\gamma(v, w) = 0$ ist.

Es wird eine Methode zur Konstruktion des Randes angegeben.

BAHMAN-MEHRI: Zur Existenz von periodischen Lösungen für gewisse nichtlineare Differentialgleichungen dritter Ordnung

Es wird eine nichtlineare Differentialgleichung der Form

$$\dddot{x} + c_1\ddot{x} + c_2\dot{x} + f(x,\ t) = e(t) \tag{1}$$

betrachtet, wo f(x, t) und e(t) bezüglich t stetige periodische Funktionen mit der Periode w sind. Die Gleichung (1) hat mindestens eine periodische Lösung, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Unter der Voraussetzung

(i) $x \cdot f(x,\ t) \geq 0$ für $|x| \geq b$ mit $b \geq 0$

(ii) $\dfrac{f(x,\ t)}{x} \to 0$ für $|x| \to \infty$

existiert zu (1) mindestens eine Lösung x(t) mit

$$\begin{aligned} x(0) &= x(w), \\ \dot{x}(0) &= \dot{x}(w), \\ \ddot{x}(0) &= \ddot{x}(w). \end{aligned} \tag{2}$$

Neben dem Beweis für (2) werden einige Beispiele angegeben, bei denen eine Abschätzung für die Amplitude der periodischen Lösung x(t) durchgeführt wird.

J. C. WILLEMS: Darstellung dynamischer Systeme

In der Systemtheorie ist es üblich, davon auszugehen, daß ein System durch eine Eingangs-Ausgangsrelation definiert ist. In vielen Fällen liegen aber Situationen vor, in denen das Ursache-Wirkungsprinzip und damit das Eingangs-Ausgangs-Verliche bezieht, feststellt. Beide Begriffe, Erwartungswert und Wahrscheinlichkeit, stellen in diesem Zusammenhang dann ebenfalls unscharfe Veränderliche dar.

A. P. WIERZBICKI: Anwendung von Straffunktionalen in Aufgaben der optimalen Steuerung und der parametrischen Optimierung eines Regelkreises

Es erfolgt zunächst ein historischer Überblick über die Einführung von Straffunktionen (penalty functions) bei der Optimierung von Funktionalen mit Gleichungen bzw. Ungleichungen als Nebenbedingungen. Dabei wird der Zusammenhang zu der Methode der Lagrangeschen Multiplikatoren aufgezeigt. Anschließend wird die Methode angewendet zur Lösung von Optimierungsproblemen mit Zustandsbeschränkungen. In diesem Zusammenhang wird nachgewiesen, wie durch Einführung sogenannter "verschobener" Straffunktionen die Konvergenz bei der iterativen Lösung verbessert werden kann.

Nach dem Beweis eines verallgemeinerten Dualitätssatzes werden Optimierungsprobleme mit mehreren Funktionalen (Polyoptimierung) behandelt. Dazu werden eine Reihe von regelungstechnischen Anwendungsbeispielen aufgeführt.

H. BURKHARDT: Transformationsansätze zur strukturspezifischen Merkmalsgewinnung

Zur Regelung von Industrierobotern werden verallgemeinerte Beobachter- und Meßsysteme benötigt. Voraussetzungen zur Manipulation von Gegenständen durch einen Roboter sind erstens die Klassifikation von Objekten, d.h. der Roboter muß ein Objekt erkennen und innerhalb einer vorgegebenen Musterklasse halten nicht eindeutig ist. Es wird deshalb der Versuch gemacht, ein System von einem mehr allgemeineren Standpunkt aus zu definieren und dies auch an einigen Beispielen zu erläutern.

S. KITAMURA: <u>Identifizierung von örtlich veränderlichen und konstanten Parametern in verteilten Systemen vom parabolischen Typ</u>

Es werden Systeme betrachtet, die durch lineare partielle Differentialgleichungen vom parabolischen Typ beschrieben werden. Im System befinden sich konstante und örtlich verteilte Parameter, die so identifiziert werden sollen, daß der Fehler zwischen dem Systemausgang und dem Ausgang eines Referenzmodells minimal wird. Das Problem wird gelöst, sowohl für verteilte als auch für punktweise Messungen. Für beide Fälle werden Bedingungen angegeben, die die Identifizierbarkeit der Parameter sicherstellen. Die theoretischen Ergebnisse werden insbesondere vom Standpunkt des Ingenieurs aus an einer Reihe von Beispielen erläutert.

H. KWAKERNAAK: <u>Unscharfe stochastische Veränderliche</u>

Unscharfe stochastische Veränderliche werden als Abbildungen eines Wahrscheinlichkeitsraumes in einen Funktionenraum definiert, dessen Elemente sogenannte Mitgliedsfunktionen (membership functions) auf R sind. Es wird ausschließlich auf diskrete unscharfe stochastische Veränderliche eingegangen. Dabei wird illustriert, wie im Rahmen der "unscharfen Logik", die von Zadeh entwickelt wurde, der Erwartungswert einer unscharfen Veränderlichen definiert werden soll. Ebenfalls wird gezeigt, wie man die Wahrscheinlichkeit eines unscharfen Ereignisses, das sich auf eine unscharfe stochastische Verändereinordnen, und zweitens die Ermittlung von Lage und Orientierung. Erst dann ist es dem Roboter möglich, das Objekt zu ergreifen und zweckdienlich innerhalb eines Prozesses weiterzuverarbeiten.

In dem Beitrag werden Transformationen diskutiert, welche translations- und rotationsinvariante, strukturspezifische Merkmale liefern. Insbesondere werden von der Fourier-Transformation abgeleitete Merkmale denen binärer Transformationen gegenübergestellt.

R. Lunderstädt (Hamburg)

Gefördert durch
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft