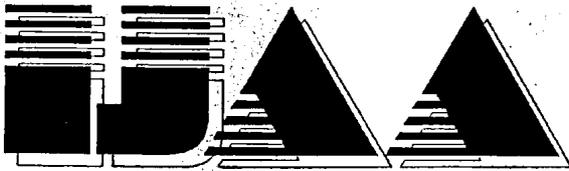


INTERNATIONAL JOURNAL AUTOMATION AUSTRIA



HEFT 1

Jg. 13, (2005)

*INHALT**Seite*

HOLL, J.; SCHLACHER, K.: Analyse von expliziten nichtlinearen, zeitdiskreten dynamischen Systemen basierend auf Lie Gruppen	1
SEKAJ, I.; FOLTIN, M.; MURGAS, J.: Self-tuning Control of Complex Systems Based on Genetic Algorithms	11
GLATZMAYER, M.; VIEHWEIDER, A.: Robuste Regelung eines flexiblen Gelenkes mittels Zustandsregelung, Internal Model Control und Backstepping	19
SCHLAGLICHTER	41
BUCHBESPRECHUNGEN	53
DISSERTATIONSKURZFASSUNGEN	61
DIPLOMARBEITEN	62
VERANSTALTUNGEN	63

Analyse von expliziten nichtlinearen, zeitdiskreten dynamischen Systemen basierend auf Lie Gruppen

J. Holl, K. Schlacher

Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung,
Christian Doppler Laboratorium für Automatisierung
mechatronischer Systeme der Stahlindustrie,
Johannes Kepler Universität Linz,
Altenbergerstr. 69, 4040 Linz, Austria.
email: johann.holl[kurt.schlacher]@jku.at

3. Dezember 2004

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Untersuchung von Systemeigenschaften nichtlinearer, zeitdiskreter dynamischer Systeme, welche durch explizite Differenzgleichungen beschrieben werden. Im Speziellen werden die Eigenschaften der Beobachtbarkeit, der Erreichbarkeit sowie der Identifizierbarkeit dieser Systemklasse basierend auf der Theorie von Lie Gruppen analysiert. Die Grundlage für den vorgestellten Zugang dieser Untersuchungen stellen dabei eine differentialgeometrische Darstellung dynamischer Systeme sowie die geometrische Interpretation der diskutierten Systemeigenschaften mittels Lie Gruppen dar. Existiert eine ein-parametrische Lie Gruppe, die auf den Zustandsgrößen des Systems operiert, so, dass der Ausgang des Systems nicht beeinflusst werden kann, so ist das System folglich nicht beobachtbar. Zur Untersuchung der Erreichbarkeitseigenschaft des Systems sucht man eine Menge von Lie Gruppen, die auf den Zuständen und den Eingangsfunktionen des Systems operiert und eine gemeinsame Invariante beinhaltet. Kann eine solche Invariante gefunden werden, folgt daraus, dass das System nicht erreichbar sein kann. Die Eigenschaft der Identifizierbarkeit kann schließlich als ein Spezialfall der Beobachtbarkeit interpretiert werden.

1 Einleitung

Die in der Physik und den Ingenieurwissenschaften auftretenden Prozesse laufen meist kontinuierlich in der Zeit ab und können mathematisch durch Differentialgleichungssysteme beschrieben werden. Nichtsdestotrotz tritt die Klasse der zeitdiskreten Systeme beim Modellieren von Prozessen auf, die eine Änderung in den abhängigen Variablen nur zu äquidistanten Zeitpunkten aufweist, wie zum Beispiel Probleme im Finanzwesen oder der Volkswirtschaft, um nur zwei zu nennen. In der Regelungstheorie führt das Diskretisieren zeitkontinuierlicher dynamischer Systeme, welches im Hinblick auf eine Implementierung

von Regelgesetzen auf Digitalrechnern betrachtet wird, auf die Klasse der zeitdiskreten dynamischen Systeme. Speziell für die Klasse der linearen und zeitinvarianten Systeme ist die Beschreibung von Regelgesetzen durch Differenzgleichungen seit nun mehr als zwei Jahrzehnten Stand der Technik. Dieser Beitrag ist daher der Untersuchung nichtlinearer, zeitdiskreter dynamischer Systeme gewidmet, die durch ein System von n_x expliziten Differenzgleichungen erster Ordnung sowie n_y Ausgangsfunktionen der Form

$$x_{k+1}^{\alpha_x} = f^{\alpha_x}(k, x_k, u_k), \quad \alpha_x = 1, \dots, n_x \quad (1a)$$

$$y_k^{\alpha_y} = c^{\alpha_y}(k, x_k, u_k), \quad \alpha_y = 1, \dots, n_y \quad (1b)$$

beschrieben werden. Dabei wird $k \in \mathbb{Z}$, welche die diskreten Zeitpunkte kT_a mit einer fixen (Abtast-) Zeit T_a beschreibt, als unabhängige Variable interpretiert, und die Zustände $x_k \in \mathcal{X} \subseteq \mathbb{R}^{n_x}$, die Eingänge $u_k \in \mathcal{U} \subseteq \mathbb{R}^{n_u}$ sowie die Ausgänge $y_k \in \mathcal{Y} \subseteq \mathbb{R}^{n_y}$, welche Elemente entsprechender glatter Zustands-, Eingangs- und Ausgangsmannigfaltigkeiten sind, bezeichnen die abhängigen Variablen. Wie in [7] gezeigt, stellt die Analyse von Beobachtbarkeits- und Erreichbarkeitseigenschaften mittels Lie Gruppen einen Zugang für zeitkontinuierliche Systeme dar, welcher auch auf implizite Systeme angewandt werden kann, ohne die Lösung des Systems berechnen zu müssen. Die fundamentale Beobachtung, dass dieser formale Zugang auch auf zeitdiskrete dynamische Systeme übertragen werden kann, bildet die Grundlage für die im Folgenden diskutierte Analyse.

Dieser Beitrag ist wie folgt gegliedert. Im Abschnitt 2 werden die verwendete Notation sowie die grundlegenden mathematischen Eigenschaften von Lie Gruppen und speziell von Transformationsgruppen überblicksartig erläutert. Der Abschnitt 3 ist dem zentralen Thema dieses Aufsatzes, der Untersuchung von Beobachtbarkeits-, Erreichbarkeits- und Identifikationseigenschaften von zeitdiskreten dynamischen Systemen, gewidmet. Die geometrische Darstellung dieser Systeme wird dafür grundlegend verwendet.

2 Mathematische Grundlagen

Da Mannigfaltigkeiten und Bündelstrukturen eine ausgezeichnete Rolle zur Beschreibung von nichtlinearen dynamischen Systemen wie auch der Systemanalyse und der Reglersynthese zukommt, werden wir diese Begriffe in diesem Beitrag auch verwenden (für eine detaillierte Behandlung dieser mathematischen Objekte sei der Leser z.B. auf [1], [6] und die Referenzen darin verwiesen). Um weiters die angeführten Formeln kurz zu halten, wird die Indexnotation der Tensorrechnung und die Einsteinsche Summenkonvention verwendet, siehe ebenfalls z.B. [1].

Die im folgenden Abschnitt behandelten Untersuchungen dynamischer Systeme machen, wie bereits erwähnt, fundamental Gebrauch von Lie Gruppen, weshalb die entsprechenden Definitionen, siehe z.B. [4], kurz zusammengefasst werden. Eine Lie Gruppe ist eine glatte Mannigfaltigkeit \mathcal{G} , die auch eine Gruppe ist und für die die Hintereinanderausführung sowie die Inverse glatte Abbildungen sind. Es sei \mathcal{M} eine glatte Mannigfaltigkeit. Eine Transformationsgruppe ist nun eine Lie Gruppe \mathcal{G} mit einer glatten Abbildung $\Phi : \mathcal{G} \times \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$, welche die Eigenschaften

$$\Phi_e(x) = x, \quad (2a)$$

$$\Phi_{g \circ h}(x) = \Phi_g \circ \Phi_h(x), \quad (2b)$$

$$\Phi_{g^{-1}} \circ \Phi_g(x) = x \quad (2c)$$

mit dem neutralen Element e von \mathcal{G} für alle $g, h \in \mathcal{G}$ und $x \in \mathcal{M}$ erfüllt. Weiters sei \mathcal{S} eine Untermannigfaltigkeit von \mathcal{M} , die Lösung eines Gleichungssystems sei. Eine Symmetriegruppe ist eine lokale Transformationsgruppe, welche der Bedingung

$$\Phi_g(\mathcal{S}) \subseteq \mathcal{S}$$

für alle $g \in \mathcal{G}$ genügt und somit Lösungen des Gleichungssystems auf andere Lösungen abbildet. Wesentlich für die weiteren Untersuchungen ist auch der Begriff einer Invarianten einer Transformationsgruppe. Eine Funktion $I : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt dann und nur dann Invariante einer Transformationsgruppe Φ , wenn

$$I(x) = I(\Phi_g(x))$$

für alle $g \in \mathcal{G}$ und $x \in \mathcal{M}$ erfüllt ist.

Die große Bedeutung der Lie Gruppen-Theorie liegt nun darin, dass die nichtlinearen Beziehungen für die Invarianz einer Funktion unter einer Transformationsgruppe durch äquivalente lineare Beziehungen unter Anwendung des entsprechenden infinitesimalen Generators einer Transformationsgruppe ersetzt werden können, wobei speziell Transformationsgruppen Φ_ε mit einem reellen Parameter $\varepsilon \in \mathbb{R}$ für die Untersuchungen dynamischer Systeme von besonderer Bedeutung sind. Als infinitesimalen Generator der Gruppe Φ_ε bezeichnet man nun jenes Vektorfeld, das durch

$$v = v^i \partial_i, \quad \partial_i = \frac{\partial}{\partial x^i}, \quad (3a)$$

$$v^i(x) = (\partial_\varepsilon \Phi_\varepsilon^i(x))|_{\varepsilon=0}, \quad (3b)$$

$x \in \mathcal{M}$, $v \in \Gamma(\mathcal{T}(\mathcal{M}))$, gegeben ist, wobei $\Gamma(\mathcal{T}(\mathcal{M}))$ die Menge aller glatten Schnitte im Tangentialbündel von \mathcal{M} beschreibt. Es sei angemerkt, dass das Vektorfeld v die einparametrische Lie Gruppe Φ_ε im Allgemeinen jedoch nur lokal generiert. Eine notwendige und hinreichende Bedingung dafür, dass eine Funktion $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Invariante einer Transformationsgruppe mit infinitesimalem Generator v ist, folgt als

$$v(f) = 0. \quad (4)$$

Ein Beweis dazu kann beispielsweise in [4] nachgelesen werden.

Diese Definitionen sowie die Bedingung für die Existenz einer Invarianten zu einer Transformationsgruppe bilden die Grundlage der Untersuchungen dynamischer Systeme hinsichtlich Beobachtbarkeit, Erreichbarkeit und Identifizierbarkeit wie sie im Folgenden betrachtet werden. Die zentrale Beobachtung ist dabei, dass die geometrische Interpretation zeitkontinuierlicher Systeme eine konsequente Erweiterung auf die Klasse der zeitdiskreten Systeme erlaubt und auch die Analyse übertragen werden kann.

3 Analyse dynamischer Systeme

Um die Analyse zeitdiskreter dynamischer Systeme zu motivieren, wird eingangs die Beobachtbarkeitsanalyse für zeitkontinuierliche Systeme und folglich die Übertragung dieser

Untersuchungen auf den zeitdiskreten Fall erläutert. Dazu wird ein System von Differentialgleichungen erster Ordnung der Form

$$\dot{x}^{\alpha_x} = f^{\alpha_x}(t, x, u), \quad \alpha_x = 1, \dots, n_x \quad (5a)$$

$$y^{\alpha_y} = c^{\alpha_y}(t, x, u), \quad \alpha_y = 1, \dots, n_y \quad (5b)$$

in der unabhängigen Variable $t \in \mathbb{R}$, mit dem Zustand $x \in \mathcal{X} \subseteq \mathbb{R}^{n_x}$, dem Eingang $u \in \mathcal{U} \subseteq \mathbb{R}^{n_u}$ und dem Ausgang $y \in \mathcal{Y} \subseteq \mathbb{R}^{n_y}$ betrachtet. Wiederum sei, um Fallunterscheidungen zu vermeiden, angenommen, dass die betrachteten Vektorfelder und Funktionen glatt seien. Mit den lokalen Koordinaten (t, x, u) für die totale Mannigfaltigkeit \mathcal{E} und t als die lokale Koordinate für die Basismannigfaltigkeit $\mathcal{B} \subseteq \mathbb{R}$ ist damit ein Bündel gegeben, welches ebenfalls mit \mathcal{E} bezeichnet werden soll. Das System (5) kann somit als eine reguläre Untermannigfaltigkeit des ersten Jet-Bündels von \mathcal{E} interpretiert werden, siehe z.B. [6].

Zur Darstellung des zeitdiskreten Systems (1) wird ein Bündel \mathcal{E}_d mit lokalen Koordinaten (k, x_k, u_k) für die totale Mannigfaltigkeit und k als lokale Koordinate für die null-dimensionale, diskrete Basismannigfaltigkeit $\mathcal{B} \subseteq \mathbb{Z}$ betrachtet. Das System (1) kann folglich wiederum als eine reguläre Untermannigfaltigkeit des trivialen Bündels $(\mathcal{E}_d \times \mathcal{X}, \text{pr}_1, \mathcal{E}_d)$, wobei pr_1 hier im Speziellen die Projektion $\text{pr}_1 : \mathcal{E}_d \times \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{E}_d$ bezeichnet, interpretiert werden.

Basierend auf diesem geometrischen Bild dynamischer Systeme erfolgt nun die Analyse, wobei wir mit der Beobachtbarkeitsuntersuchung beginnen wollen.

3.1 Beobachtbarkeit

Zur Analyse der Beobachtbarkeitseigenschaft zeitkontinuierlicher Systeme sei angenommen, dass wir für allgemeine Eingangsfunktionen u eine ein-parametrische Symmetriegruppe $\Phi_\epsilon : \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{E}$, welche lediglich auf den Zustandsgrößen operiert,

$$(t, \bar{x}, u) = \Phi_\epsilon(t, x, u),$$

mit zugehörigem infinitesimalen Generator

$$v|_x = (\partial_\epsilon \Phi_\epsilon)|_{\epsilon=0} = X^{\alpha_x} \partial_{\alpha_x},$$

so finden können, dass die Ausgangsfunktionen c^{α_y} Invarianten dieser Symmetriegruppe sind und damit der Ausgang unverändert bleibt. Existiert nun eine solche nicht triviale Transformationsgruppe, so ist das System offensichtlich nicht beobachtbar, und das System kann mittels einer diffeomorphen Zustandstransformation $\varphi : (x^{\alpha_x}, u^{\alpha_u}) \rightarrow (r^{\alpha_r}, s^{\alpha_s}, u^{\alpha_u})$, $\alpha_r = 1, \dots, n_r \geq 1$, $\alpha_s = 1, \dots, n_x - n_r$ in ein System der Form

$$\dot{r}^{\alpha_r} = \bar{f}^{\alpha_r}(t, r, u)$$

$$\dot{s}^{\alpha_s} = \bar{f}^{n_r + \alpha_s}(t, r, s, u)$$

$$y^{\alpha_y} = \bar{c}^{\alpha_y}(t, r, u)$$

übergeführt werden. Um nun die Existenz einer Transformationsgruppe, für welche die Ausgangsfunktionen Invarianten darstellen, zu überprüfen, wird das infinitesimale Kriterium (4) bemüht, welches angewandt auf das Beobachtbarkeitsproblem

$$v(c^{\alpha_y}) = X^{\beta_x} \partial_{\beta_x} c^{\alpha_y} = \langle dc^{\alpha_y}, v \rangle = 0 \quad (6)$$

zur Folge hat. Das infinitesimale Kriterium erlaubt somit den Nachweis der Existenz einer Transformationsgruppe durch den zugehörigen infinitesimalen Generator. Es muss folglich die Existenz eines nicht trivialen Vektorfeldes v untersucht werden. Dazu wird die Bedingung

$$\Phi_\varepsilon \circ \phi_t^{fc} = \phi_t^{fc} \circ \Phi_\varepsilon, \quad (7)$$

wobei ϕ_t^{fc} dem Fluss zu (5a) entspricht und somit die Gl. (7) sicherstellt, dass die betrachtete Transformationsgruppe auch eine Symmetriegruppe ist, untersucht, siehe dazu Abbildung 1. Dazu ist es wiederum notwendig und hinreichend (siehe z.B. [4]) das ent-

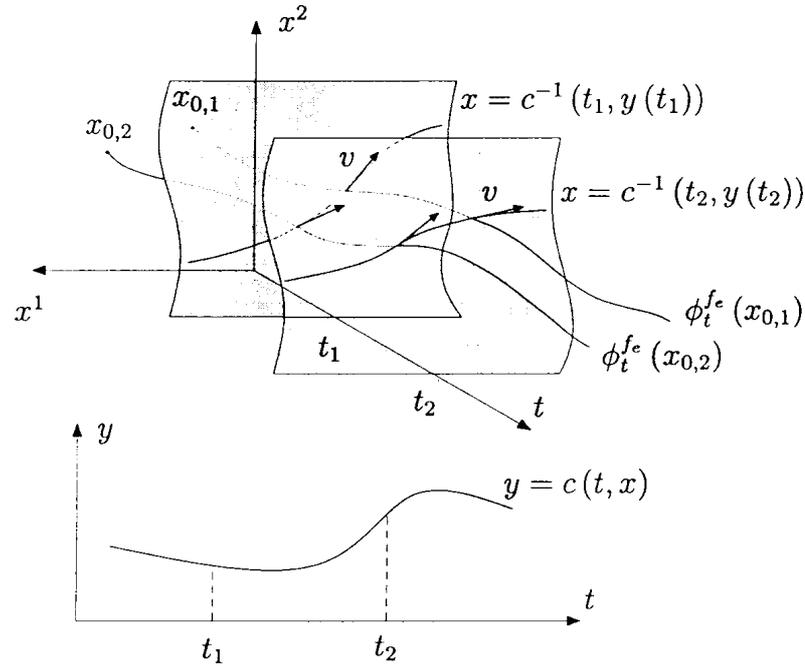


Abbildung 1: Zur Beobachtbarkeitsuntersuchung zeitkontinuierlicher dynamischer Systeme mittels Symmetriegruppen für gegebene Eingangsfunktionen $u = u(t)$.

sprechende infinitesimale Kriterium zu betrachten, welches

$$d_t (X^{\alpha_x}) = \partial_{\beta_x} f^{\alpha_x} X^{\beta_x} \quad (8)$$

mit dem Vektorfeld der totalen zeitlichen Änderung

$$d_t = \partial_t + f^{\alpha_x} \partial_{\alpha_x} + u_{j+1}^{\alpha_u} \partial_{\alpha_u}^j, \quad \partial_{\alpha_u}^j = \frac{\partial}{\partial u_j^{\alpha_u}}, \quad j = 0, \dots, \infty$$

liefert, wobei $u_j^{\alpha_u}$ als Zeitfunktion betrachtet und mit

$$u_j^{\alpha_u}(t) = \frac{\partial^j}{\partial t^j} u^{\alpha_u}(t)$$

identifiziert wird, siehe wiederum [6]. Um nun zu überprüfen, ob das System (5a) mit den Bedingungen (6) und (8) eine nicht triviale Lösung für v hat, müssen die entsprechenden Integrabilitätsbedingungen betrachtet werden, welche durch wiederholtes Bilden der totalen zeitlichen Ableitung von (6) und Substituieren von (8) und (5a) folgen. Dieser Vorgang

des Bilden der totalen zeitlichen Ableitung und nachfolgendes Substituieren wird auch als Prolongieren und Projizieren bezeichnet. Für das Beobachtbarkeitsproblem liefert dieser Prozess schließlich

$$\langle L_{f_e}^i dc^{\alpha y}, v \rangle = 0, \quad i = 0, \dots, n_x - 1 \quad (9)$$

mit der wiederholten Lie Ableitung $L_{f_e}^i dc^{\alpha y}$ der 1-Form $dc^{\alpha y}$ entlang des Vektorfeldes f_e , wobei gilt

$$L_{f_e}^i dc^{\alpha y} = f_e (L_{f_e}^{i-1} dc^{\alpha y}) \quad \text{für } i \geq 1 \quad \text{und} \quad L_{f_e}^0 dc^{\alpha y} = dc^{\alpha y}$$

sowie

$$f_e = \partial_t + f^{\alpha x} \partial_{\alpha x} + u_{j+1}^{\alpha u} \partial_{\alpha u}^j, \quad j = 0, \dots, \infty.$$

Ein Kriterium für Beobachtbarkeit des dynamischen Systems (5) für gegebene Eingangsfunktionen u folgt damit durch Überprüfen der 1-Formen $\{L_{f_e}^i dc^{\alpha y}\}$ auf lineare Unabhängigkeit. Sind diese linear unabhängig, so existiert keine nicht triviale Lösung für v und das System (5) ist folglich lokal beobachtbar. Weiters kann mit diesem Test auch die Frage nach der Existenz von Eingangsfunktionen u , sodass das System (5) lokal beobachtbar ist, geklärt werden. Der Leser überzeugt sich sehr leicht, dass beispielsweise für lineare und zeitinvariante Systeme das wohlbekannte Beobachtbarkeitskriterium folgt.

Dieser Zugang lässt sich nun geradlinig auf zeitdiskrete Systeme übertragen, wie im Folgenden gezeigt wird. Analog zur Analyse zeitkontinuierlicher Systeme sei angenommen, dass eine auf den Zuständen des zeitdiskreten Systems (1) operierende Symmetriegruppe $\Phi_\varepsilon : \mathcal{E}_d \rightarrow \mathcal{E}_d$,

$$(k, \bar{x}_k, u_k) = \Phi_\varepsilon (k, x_k, u_k) = \Phi_{k,\varepsilon},$$

mit infinitesimalem Generator

$$v|_{x_k} = v_k = (\partial_\varepsilon \Phi_{k,\varepsilon})|_{\varepsilon=0} = X_k^{\alpha x} \partial_{\alpha x}$$

so existiert, dass die Ausgangsfunktionen $c_k^{\alpha y}$ Invarianten von $\Phi_{k,\varepsilon}$ sind. Dies kann wiederum durch das infinitesimale Kriterium

$$v_k (c_k^{\alpha y}) = X_k^{\beta x} \partial_{\beta x} c_k^{\alpha y} = \langle dc_k^{\alpha y}, v_k \rangle = 0 \quad (10)$$

überprüft werden. Die infinitesimale Bedingung dafür, dass die Transformationsgruppe und der Fluss des Systems kommutieren und somit die betrachtete Transformationsgruppe auch eine Symmetriegruppe ist, folgt für den zeitdiskreten Fall zu

$$\sigma (X_k^{\alpha x}) = X_{k+1}^{\alpha x} = X_k^{\beta x} \partial_{\beta x} f_k^{\alpha x}, \quad (11)$$

wobei σ den Verschiebeoperator bezeichnet. Die geometrische Interpretation von (10) und (11) ist in Abbildung 2 wiederum für eine zwei-dimensionale Zustandsmannigfaltigkeit verdeutlicht. Da nun die infinitesimale Invarianz für alle Zeitschritte erfüllt sein muss, erhält man zur Überprüfung der Existenz eines nicht trivialen Vektorfeldes v_k für (10), (1a) und (11) die algebraischen Restriktionen

$$\langle \omega_i, v_k \rangle = 0, \quad i = 0, \dots, n_x - 1, \quad (12)$$

wobei für die 1-Formen die Abkürzungen

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \partial_{\alpha x} c_k^{\alpha y} dx^{\alpha x} \\ \omega_i &= \partial_{\alpha x} c_{k+i}^{\alpha y} \partial_{\beta x} f_{k+i-1}^{\alpha x} \partial_{\gamma x} f_{k+i-2}^{\beta x} \dots \partial_{\eta x} f_k^{\zeta x} dx^{\eta x}, \quad i = 1, \dots, n_x - 1 \end{aligned}$$

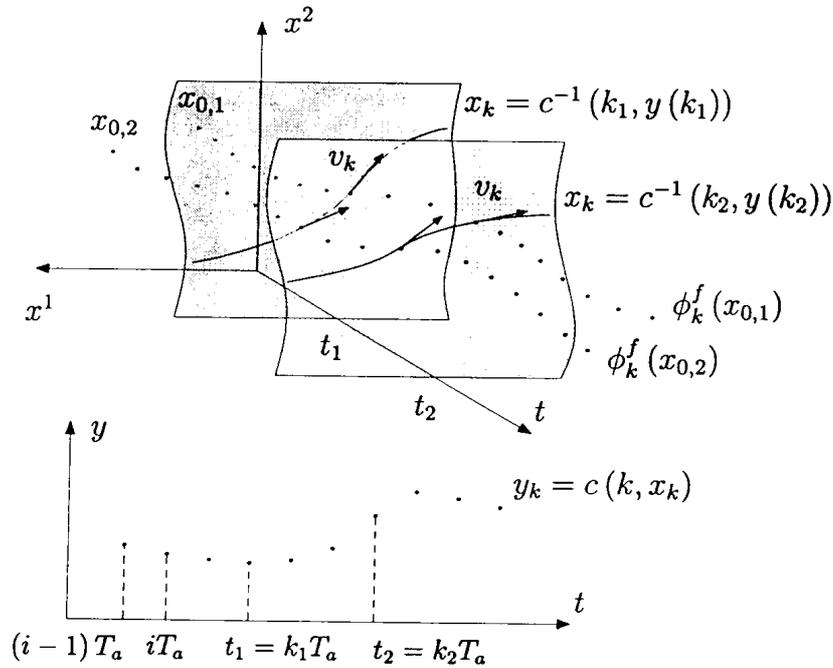


Abbildung 2: Zur Beobachtbarkeitsuntersuchung zeitdiskreter dynamischer Systeme mittels Symmetriegruppen für gegebene Eingangsfolgen $u = u(k)$.

und für die partiellen Ableitungen

$$\partial_{\alpha_x} c_{k+i}^{\alpha_y} = \partial_{x_{k+i}^{\alpha_x}} c_{k+i}^{\alpha_y}$$

geschrieben wurden. Ein Kriterium zur Bestimmung der Beobachtbarkeitseigenschaft eines diskreten dynamischen Systems folgt somit durch Überprüfen der linearen Unabhängigkeit der 1-Formen $\{\omega_i\}$. Sind diese linear unabhängig, existiert für v_k nur die triviale Lösung und das zeitdiskrete System ist damit beobachtbar. Andernfalls kann ein Diffeomorphismus $\varphi_k : (x_k^{\alpha_x}, u_k^{\alpha_u}) \rightarrow (r_k^{\alpha_r}, s_k^{\alpha_s}, u_k^{\alpha_u})$, $\alpha_r = 1, \dots, n_r \geq 1$, $\alpha_s = 1, \dots, n_x - n_r$ so gefunden werden, dass das System in den neuen Koordinaten die Form

$$\begin{aligned} r_{k+1}^{\alpha_r} &= \bar{f}^{\alpha_r}(k, r_k, u_k) \\ s_{k+1}^{\alpha_s} &= \bar{f}^{n_r + \alpha_s}(k, r_k, s_k, u_k) \\ y_k^{\alpha_y} &= \bar{c}^{\alpha_y}(k, r_k, u_k) \end{aligned}$$

aufweist. Wendet man obige Methode auf lineare und zeitinvariante Systeme an, so erhält man natürlich auch hierfür das wohlbekanntes Beobachtbarkeitskriterium für zeitdiskrete Systeme.

3.2 Erreichbarkeit

Die Überprüfung der Beobachtbarkeit eines dynamischen Systems wurde im vorangegangenen Abschnitt sowohl für zeitkontinuierliche wie auch für zeitdiskrete Systeme erläutert. Es wurde damit versucht, die Analogie dieser Analyse zu verdeutlichen. Für die Diskussion der Erreichbarkeit wollen wir deshalb nur den zeitdiskreten Fall behandeln.

Dazu wählen wir eine Menge von ein-parametrischen Symmetriegruppen, welche auf den abhängigen Variablen x_k, u_k operieren, wobei

$$\Phi_\varepsilon : (k, x_k, u_k) \rightarrow (k, \bar{x}_k, \bar{u}_k)$$

mit zugehörigem infinitesimalen Generator

$$v|_{x_k} = v_k = X_k^{\alpha_x} \partial_{\alpha_x} + U_k^{\alpha_u} \partial_{\alpha_u}$$

eine Untermenge dieser Gruppen sei. Besitzt nun diese Untermenge eine nicht triviale Invariante $I(k, x_k) = I_k$, dann ist das System nicht erreichbar und es existiert ein Diffeomorphismus $\varphi_k : (x_k^{\alpha_x}, u_k^{\alpha_u}) \rightarrow (r_k^{\alpha_r}, s_k^{\alpha_s}, u_k^{\alpha_u})$, $\alpha_r = 1, \dots, n_r$, $\alpha_s = 1, \dots, n_x - n_r \geq 1$ so, dass das System in der Form

$$\begin{aligned} r_{k+1}^{\alpha_r} &= \bar{f}^{\alpha_r}(k, r_k, s_k, u_k) \\ s_{k+1}^{\alpha_s} &= \bar{f}^{n_r + \alpha_s}(k, s_k) \end{aligned}$$

geschrieben werden kann. Der Nachweis der Existenz einer solchen Invarianten I_k wird wiederum mittels des infinitesimalen Kriteriums

$$v_k(I_k) = \langle \omega_k, v_k \rangle = 0, \quad \omega_k = \omega_{k, \alpha_x}(k, x_k) dx^{\alpha_x} \quad (13)$$

geführt. Damit die betrachtete Transformationsgruppe auch eine Symmetriegruppe ist, folgt als weitere infinitesimale Bedingung

$$\sigma(X_k^{\alpha_x}) = \partial_{\beta_x} f_k^{\alpha_x} X_k^{\beta_x} + \partial_{\alpha_u} f_k^{\alpha_x} U_k^{\alpha_u}, \quad (14)$$

siehe dazu Abbildung 3. Da nun die Beziehung (13) für alle Zeitschritte erfüllt sein muss,

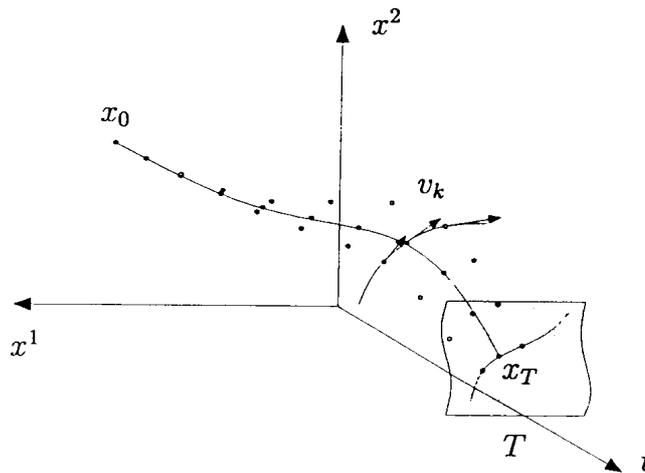


Abbildung 3: Zur Erreichbarkeitsuntersuchung zeitdiskreter dynamischer Systeme mittels Symmetriegruppen.

folgt daraus, dass auch

$$\sigma(\langle \omega_k, v_k \rangle) - \langle \omega_k, v_k \rangle = 0$$

für jegliche Wahl von X_k und U_k hält und man erhält somit die Beziehungen

$$\begin{aligned}\omega_{k+1, \alpha_x} \partial_{\beta_x} f_k^{\alpha_x} - \omega_{k, \beta_x} &= 0, \\ \omega_{k+1, \alpha_x} \partial_{\alpha_u} f_k^{\alpha_x} &= 0.\end{aligned}$$

Unter der Annahme, dass die Jacobi-Matrix $[\partial_{\beta_x} f_{k+i}^{\alpha_x}]$ nicht singulär ist und dass $\Delta = \text{span}\{\bar{w}_j\}$ der involutive Abschluss der Vektorfelder

$$w_i = \left(\partial_{\eta_x} f_k^{\zeta_x}\right)^{-1} \dots \left(\partial_{\beta_x} f_{k+i}^{\alpha_x}\right)^{-1} \partial_{\alpha_u} f_{k+i}^{\alpha_x} \partial_{\eta_x}$$

ist, folgen die algebraischen Restriktionen für (13), (1a) und (14) zu

$$\langle \omega_k, \bar{w}_j \rangle = 0, \quad j = 0, \dots, n_x - 1.$$

Gilt nun $\dim(\Delta) = n_x$, dann existiert für ω_k nur die triviale Lösung, was zur Folge hat, dass die Untermenge der betrachteten Lie Gruppen keine Invariante I_k enthalten und somit das System (1) lokal erreichbar ist. Der Test auf lokale Erreichbarkeit folgt damit durch eine Dimensionsprüfung der Distribution Δ .

Es sei angemerkt, dass im Falle einer singulären Jacobi-Matrix $[\partial_{\beta_x} f_{k+i}^{\alpha_x}]$ gesonderte Untersuchungen hinsichtlich Erreichbarkeit erforderlich sind.

3.3 Identifizierbarkeit

Von weiterem Interesse ist für dynamische Systeme die Eigenschaft der Identifizierbarkeit von Parametern. Betrachtet wird dazu das System der Form

$$x_{k+1}^{\alpha_x} = f^{\alpha_x}(k, x_k, u_k, p), \quad \alpha_x = 1, \dots, n_x \quad (15a)$$

$$y_k^{\alpha_y} = c^{\alpha_y}(k, x_k, u_k, p), \quad \alpha_y = 1, \dots, n_y \quad (15b)$$

mit unbekanntem aber konstanten Parametern $p \in \mathbb{R}^{n_p}$. Ziel dieser Untersuchung ist es, ein Kriterium anzugeben, anhand dessen beurteilt werden kann, ob die Parameter prinzipiell unter Kenntnis der Ausgangsfolge für eine vorgegebene Eingangsfolge identifizierbar sind.

Der Tatsache, dass es sich bei den zu identifizierenden Parametern um konstante Größen handelt, wird durch Hinzufügen der trivialen Differenzgleichungen

$$p_{k+1}^{\alpha_p} = p_k^{\alpha_p}, \quad \alpha_p = 1, \dots, n_p$$

Rechnung getragen. Damit erhält man schließlich das zu analysierende System in der Form

$$x_{k+1}^{\alpha_x} = f^{\alpha_x}(k, x_k, u_k, p), \quad \alpha_x = 1, \dots, n_x \quad (16a)$$

$$p_{k+1}^{\alpha_p} = p_k^{\alpha_p}, \quad \alpha_p = 1, \dots, n_p \quad (16b)$$

$$y_k^{\alpha_y} = c^{\alpha_y}(k, x_k, u_k, p), \quad \alpha_y = 1, \dots, n_y. \quad (16c)$$

Es ist nun offensichtlich, dass das Problem der Identifizierbarkeit auf jenes der Beobachtbarkeit für das Teilsystem $p_k^{\alpha_p}$ reduziert werden kann.

4 Anmerkungen und Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass die für nichtlineare zeitkontinuierliche Systeme bekannte Systemanalyse hinsichtlich Beobachtbarkeit, Erreichbarkeit und Identifizierbarkeit mittels Lie Gruppen auf nichtlineare, zeitdiskrete Systeme übertragen werden kann. Essentiell ist dabei die geometrische Interpretation dynamischer Systeme sowie die Wirkung von Transformationsgruppen auf die Lösung dieser Systeme. Obwohl nun diese Transformationsgruppen auf den Lösungen der Systeme operieren, müssen diese jedoch für die Überprüfung der Systemeigenschaften nicht bekannt sein.

Weiters sei angemerkt, dass sich diese Methoden auch auf implizite Systeme anwenden lassen. Auch dabei muss natürlich die Lösung des Systems nicht explizit bekannt sein. Darüberhinaus ist es auch nicht erforderlich, ein implizites System in ein äquivalentes explizites überzuführen.

Literatur

- [1] Boothby W.M.: *An Introduction to Differentiable Manifolds and Riemannian Geometry*. 2. Ausg., Academic Press Inc., 1986.
- [2] Isidori A.: *Nonlinear Control Systems*. 3. Ausg., Springer, 1995.
- [3] Nijmeijer H., van der Schaft A.J.: *Nonlinear Dynamical Control Systems*. Springer, 1991.
- [4] Olver P.J.: *Application of Lie Groups to Differential Equations*. 2. Ausg., Springer, 1993.
- [5] Sastry S.: *Nonlinear Systems. Analysis, Stability and Control*. Springer, 1999.
- [6] Saunders D.J.: *The Geometry of Jet Bundles*. Cambridge University Press, 1989.
- [7] Schlacher K., Kugi A. und Zehetleitner K.: *A Lie Group Approach for Nonlinear Dynamic Systems Described by Implicit Ordinary Differential Equations*. In Proceedings of Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS), 2002.
- [8] Schlacher K. und Zehetleitner K.: *Computer Algebra Algorithms for Control Related Tests of Implicit Dynamic Systems*. In Proceedings of Applied Mathematics and Mechanics (PAMM), Vol. 3, S. 140–143, 2003.

Self-tuning Control of Complex Systems Based on Genetic Algorithms

I.Sekaj, M.Foltin, J.Murgaš

Department of Automatic Control Systems, Faculty of Electrical Engineering
and Information Technology, Slovak University of Technology,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovak Republic
Phone : ++421 2 602 91 585, e-mail : sekaj@kasr.elf.stuba.sk

Abstract

Problem of a self-tuning algorithm design for control of complex and time-variant systems has been solved. The proposed adaptive control mechanism covers the identification of the controlled object using artificial neural networks, which is performed after detected environment changes and a genetic algorithm based controller design procedure. The structure of the genetic algorithm is optimized from the convergence-speed point of view using a proposed method, which exploits an archive of previous solutions from history.

1 Introduction

This project has been inspired by the need of control of complex processes with time-variant behavior. Such controlled systems can contain more inputs and outputs (MIMO), they may consist from linear and non-linear parts, time delays, non-minimum-phase systems etc. Additionally, in time-variant systems the parameters and/or their structure are not constant during the time. The control of such systems is not a simple task and it brings at least two questions. The first is how to obtain the current model of a complex system during its normal closed-loop operation and the second is the controller design of this system based on the achieved model.

In this paper a possible solution of this problem is proposed. It uses artificial neural networks (ANN) for process modeling and genetic algorithms (GA) as a mean of control system design. The use of ANN for complex and nonlinear dynamic process modeling give good results and is well described in literature e.g. [Norgaard, Narendra]. We will focus our interest to the second question. The GA is a powerful optimization approach [Goldberg, Michaliewicz and others], which can be with advantage used for the design and optimization of different types of dynamic systems. In the presented adaptive method we will use a new approach, where GA's optimization is based on minimizing a cost function, which consists of the closed-loop simulation and performance index evaluation [Sekaj99]. The only condition is the existence of an appropriate computer model of the controlled object and the possibility to evaluate the dynamic characteristics of the closed-loop in each point of the considered search space.

The block scheme of the adaptive control structure is in Fig.1. As mentioned, the proposed adaptation mechanism employs the identification of the controlled system during its normal operation in the closed-loop. The ANN model identification follow after each process behavior change, which can be detected thanks the control performance violation or using

additional process information. The identification is followed by the GA-based design of the controller, which is described in section 2. The self-tuning adaptation mechanism is described in more details in section 4 in case of the control of a MIMO servo-system. In order to timely respond to environment changes, a sufficient convergence speed is an important requirement for the GA procedure. From this reason a new method for GA acceleration has been proposed and explained in section 3. The method uses data archiving of previous solutions, which can be exploited under repeated or similar environment conditions having already occurred in history.

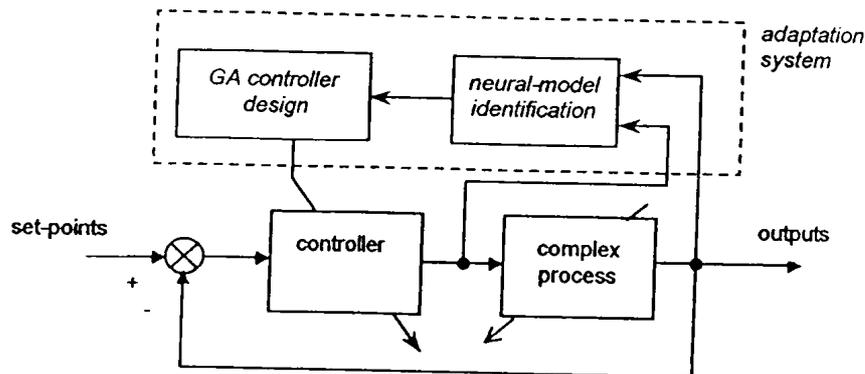


Fig.1. Block scheme of the self-tuning control structure

2 Application of genetic algorithms for the control system design

In the field of GA-based design or optimization of control systems (or generally - of dynamic systems) it is in general possible to search for the best system structure or for the best parameters of a defined system structure or to solve both tasks together. Different authors have used GA's for different control design tasks e.g. [Herrero, Kawabe, Khatib, Mitsukura]. The character of these GA's normally doesn't differ from standard GA optimization tasks. The items of the optimized string (chromosome) are the control system parameters. These parameters are in general real-number values and their number depends on the type of the considered application. Often their number ranges from tens to hundreds.

In our approach the GA optimization is connected with computer simulation. The main feature of the dynamic system optimization tasks is the objective function (fitness) evaluation consisting from two parts. The first one is the dynamic system model simulation by means of a software-tool, which is able to mimic the dynamic behavior of the real object. The second part is the evaluation of a performance index, which is quantifying the relevant properties of the closed-loop behavior. Block scheme of the used GA is in the left side of Fig.3 and consists from the cycle of basic steps: 1.initialisation of the population, 2.objective function evaluation (fitness), 3.test of terminating conditions, 4.crossover and mutation, 5.new population creation and jump to step 2.

Different performance indexes can be used for the control design, depending on the used control structure and the particular control goal. Frequently integral performance indexes are employed. Let us consider the simple example of a feedback structure (Fig.2) where y is the controlled variable, u is the control variable, e is the control error ($e=w-y$) and w is the set-

point (reference value). A simple performance index, which minimization normally ensures good control properties is as follows

$$J = \int_0^T |e(t)| dt \rightarrow \min$$

where T is the defined closed-loop simulation time.

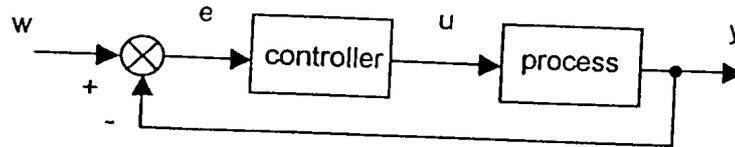


Fig.2. Simple feedback control loop

3 The use of an archive of previous solutions

Because in time-variant systems the parameters of the controlled systems are changing in time, also the objective function of our optimisation process is changing. In such cases the used optimization method should be able to give the solution fast enough to timely respond to the environment changes. Additionally, in our application the conditions are repeated more or less periodically or the new conditions are similar to those, which already occurred in the history. Therefore it is advantageous to save the old solutions – strings, which belong to past objective functions into an archive. In the future it is possible to use the old “experience” for speed-up the new GA runs.

Consider, that the optimization task to be solved by GA is formulated by the criterion function $J_k = f_k(x) \rightarrow \min$ with the constraints $g_k(x) > 0$ and $h_k(x) = 0$, where $x \in R^n$ is the vector of a potential solution, which is encoded into the string $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ and k is the order number of the current change of the (controlled system) conditions. Under a condition change we shall understand an arbitrary change of parameters or structure of the criterion function f , or of the constraints g or h .

The principle of the proposed mechanism consists in repeating the procedure of saving the current solution and searching for past solutions after each reformulation of the optimisation task. That means, that in the first phase, the GA finds the optimal (sub-optimal) solution under the conditions $\{f_k, g_k, h_k\}$ and the best string x_k^* is saved into the archive. The archive has the form of a matrix with n columns - which correspond to the number of genes in the string, and m rows - where each row is a record of the solution under some environmental conditions. When some new change in the environment occurs, which represents the $(k+1)$ -th modification of the conditions, such a solution is searched in the archive, which best meets the new criterion $\{f_{k+1}, g_{k+1}, h_{k+1}\}$. This string (or several strings) is copied into the new population of the GA and the solution continues. Another possible way is to use the best string in the reinitialization phase of the GA. Anyway, should there be similar conditions in the history, it can be assumed, that this information will accelerate the next GA solutions.

The proposed algorithm could be integrated into different GA structures. For illustration let us consider a particular type of GA, which block diagram is in Fig.3. In the first step of this algorithm, the population of s strings is initialized (or reinitialized). Next, the k -th criterion function values (fitnesses) are evaluated for the entire population. Then the termination conditions are tested and if not fulfilled, a first group of b strings (including the best one) are copied into the new population without any change. The second group of $(s-b-a)$ strings, which can also contain the best strings, is chosen for genetic operations. After the genetic operations these strings are added into the new population, too. Finally, the last - third group of a strings from the archive is added to the new population. This cycle repeats until the termination conditions are fulfilled and then the best solution is saved into the archive. Afterwards, the algorithm is waiting for next changes of the optimization criterion. When these occur, all strings from the archive are evaluated using this $(k+1)$ -st criterion. The best solution (or more solutions) with respect to the new conditions is then used in the third group of a strings ($a \geq 1$) in each generation. The algorithm repeats until the $(k+1)$ -st optimal solution is found.

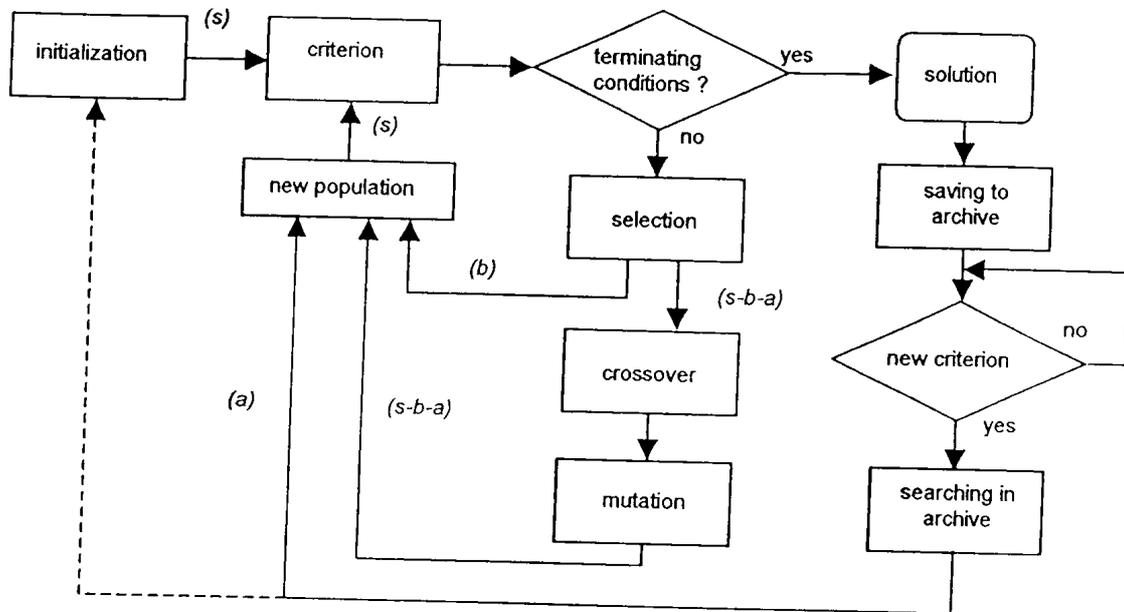


Fig.3 Block diagram of GA with an archive of past solutions

Remark: Another way of using the archive is to insert the best solutions only once during the reinitialization phase of the population in a new GA run (the dashed line in Fig.3).

4 Self-tuning control and experimental results

Without loss of generality let us consider that the controlled object is an electromechanical system with two servomotors [Sekaj02]. Between the two motors there are strong interactions. The speed change of the first drive influences the second one and vice versa. The goal is the independent speed control of both motors to desired values with interaction minimization. The block scheme of the object with the considered control structure is in Fig.4. The controlled motors are marked S_{11} and S_{22} , and their interactions are S_{21} and S_{12} . For

the speed control (y_1 and y_2), two independent PID controllers have been used - PID_1 and PID_2 , each with three parameters (P , I and D), and for the compensation of interactions two linear compensators C_1 and C_2 realized by a 2nd order transfer function have been considered (Fig.4). Dynamic parameters of the controlled process are changing according to the change of external mechanical load. These changes, which have low frequency (about 1-3 times per hour), have a considerable influence on the system dynamic behavior change. Therefore it is necessary to adapt the parameters of the control structure.

The adaptation process is as follows (Fig.1). After the load change, in consequence of the discrepancy between the actual controller parameters and the new system dynamics the degraded control performance (oscillations, a too long settling time etc.) appear. The adaptation mechanism firstly starts the identification process, which updates the model parameters. Note, that the dynamic model identification may be performed only during the normal closed-loop operation of the complex system with strong interactions between subsystems. After trying of different model types and different identification methods, the artificial neural network - a three layer perceptron net has been used. After the identification phase the GA-based control design procedure has started. Here the optimized string (chromosome) consists from 14 parameters of the considered control structure

$$string=[P_1, I_1, D_1, q_{11}, q_{10}, p_{11}, p_{10}, P_2, I_2, D_2, q_{21}, q_{20}, p_{21}, p_{20}]$$

The evaluation of the criterion function includes the closed-loop simulation and the evaluation of the intergral in the form

$$J = \int_0^T (\alpha|e_1| + (1-\alpha)|\dot{e}_1| + \beta|e_2| + (1-\beta)|\dot{e}_2|) dt$$

where e_1 and e_2 are control errors, \dot{e}_1 and \dot{e}_2 are control error derivatives, $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$ are weight coefficients and T is the defined time interval (estimated maximal closed-loop settling time). The simplest way to determine the weights, which have influence on the control properties is experimental. By increasing α and β , a fast response with some overshoot (normally about 5%) can be obtained. On the other hand decreasing α and β causes a slowdown of the control process and overshoot damping. After completing the GA-run, the PID's and the compensators C_1 and C_2 are updated. Then, the adaptation mechanism is waiting for next load changes and the entire adaptation procedure repeats.

In the real-time experiment of the servo system adaptive control 8 adaptation cycles after 8 load changes have been realized. Two independent adaptation cycles are depicted in Fig.5 and Fig.6. Each cycle contain setpoint step responses of both outputs y_1 and y_2 , which follows after a load change of both motors (Fig.5a or Fig.6a) and step responses of both outputs after the adaptation process (Fig.5b or Fig.6b). In Fig.6a after the load change unstability of the motor 2 appear, which is eliminated after the adaptation.

In Fig.7 there is a comparison of the convergence processes of a simple GA without the use of the proposed extention with the archive (marked 1) and of the extended GA with the use of the archive of past solutions (marked 2 and bold) after 8 adaptation cycles. Each GA-run has taken 500 generations. From the results it is evident, that in the first two adaptation cycles

(1000 generations), when still no information about previous solutions was available, the results of both GA versions are similar. But later on - in next cycles, the availability of growing "experience" from the archive starts significantly speeding-up the GA-convergence process. The use of this approach is able significantly to speed-up the optimal parameter computation.

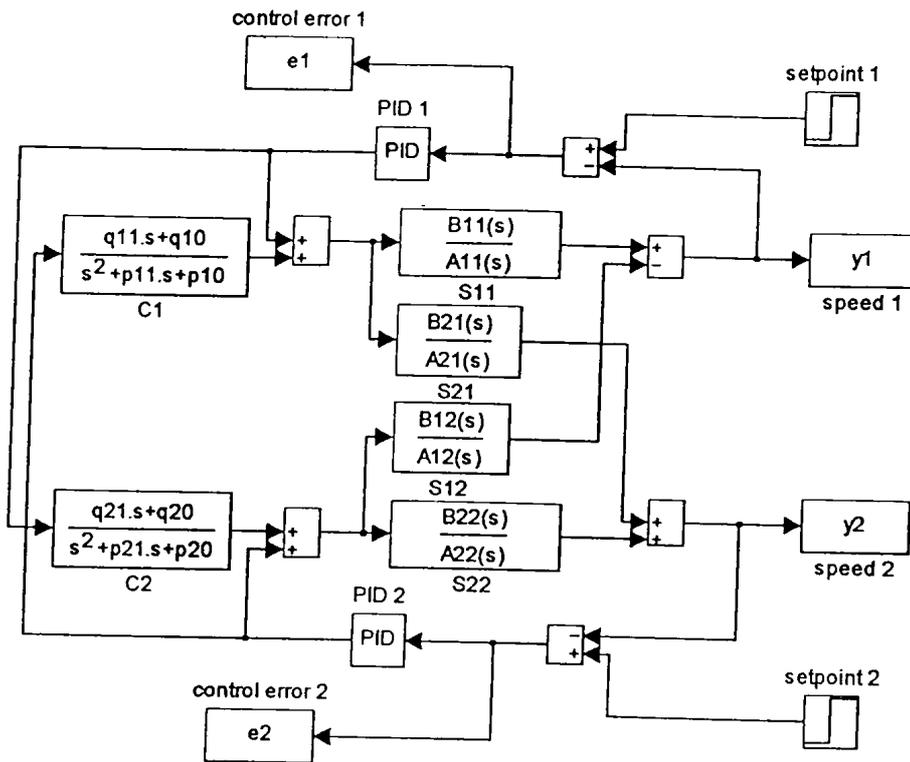


Fig.4 Block scheme of the closed-loop with two servo-systems

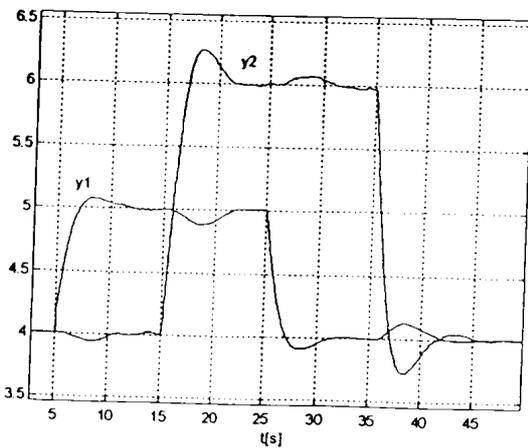


Fig.5a Setpoint step responses of y_1 and y_2 after load changes

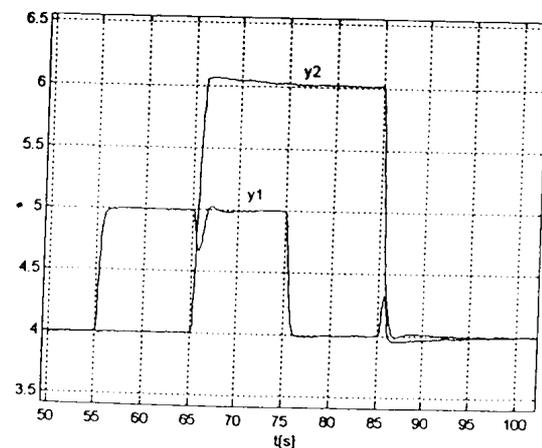


Fig.5b Setpoint step responses of y_1 and y_2 after adaptation

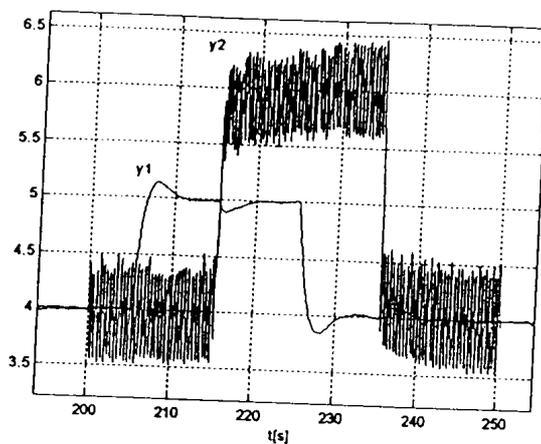


Fig.6a Setpoint step responses of y_1 and y_2 after load changes

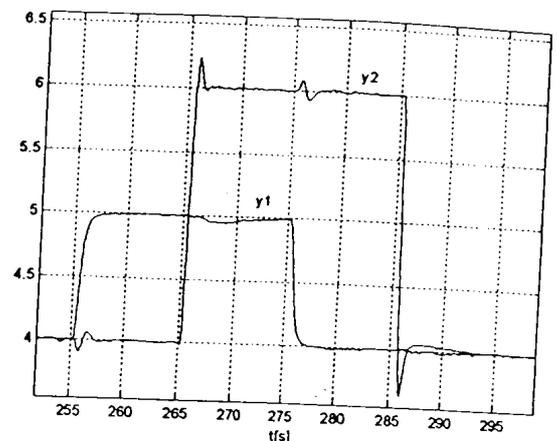


Fig.6b Setpoint step responses of y_1 and y_2 after adaptation

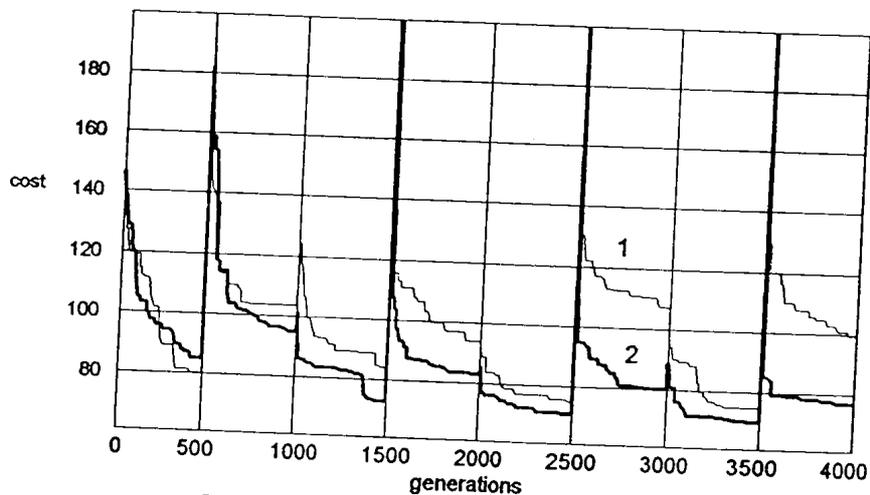


Fig.7 Comparison of GA konvergence:
1-simple GA, 2 - GA using the archive of past solutions (bold)

5 Conclusion

The control of complex dynamical systems could be a difficult task by itself. In our case, this is additionally complicated by a time-variable behaviour of the controlled system. Our results have shown, that it is advantageous to solve such problems by means of a genetic algorithm-based adaptation mechanism. In this paper a standard GA procedure is extended by a method, which is based on the use of an archive of previous solutions. This can considerably speed-up the GA convergence process, mainly when repeating or similar environment conditions occur. The entire adaptation algorithm, which consist from the neural network based system identification and the GA is able to design the complex control structure and so to respond to condition changes of the controlled system. The described adaptive system is robust and powerful and it can be applied for different complex control systems including MIMO systems, high order systems, non-linear systems etc. The only limitation of this control strategy is, that the frequency of the system behaviour changes must allow the control algorithm to execute the identification and the GA-based control design procedure. Typical areas, where this "batch adaptation" is applicable are control of a wide range of complex industrial processes with slow continuous changes of dynamic characteristics, which are

typical in **chemical** or thermal processes etc., but also different processes with "fast" dynamics (**mechanical, electrical, hydraulic**), but with low frequency of step-type changes of dynamic behaviour. Perhaps, the proposed approach can be employed also in some non-technical applications.

References

- [Goldberg] D.E.Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimisation, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989.
- [Herrero] J.M.Herrero, X.Blasco, M.Martínez, J.V.Salcedo: *Optimal PID Tuning with Genetic Algorithms for Non Linear Process Models*, Proceedings on the 15th World Congress of IFAC, Barcelona, 21-26 July 2002
- [Kawabe] T.Kawabe, T.Tagami, T.Katayama: *A Genetic Algorithm based Minimax Optimal Design of Robust I-PD Controller*, UKACC Int. Conference on Control '96, 2-5 September 1996, Conf. Publication No. 427, IEE 1996, pp.436-441
- [Khatib] W.Khatib, V.Silva, A.Chipperfield, P.Fleming: *Multidisciplinary Optimisation With Evolutionary Computing for Control Design*, Proceedings on the 14th World Congress of IFAC, Beijing, July 5-9, 1999
- [Michalewicz] Z.Michalewicz: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer 1992
- [Mitsukura] Y.Mitsukura, T.Yamamoto, M.Kaneda, K.Fujii: *Evolutionary Computation in Designing a PID Control System*, Proceedings on the IFAC World Congress 1999, Beijing, July 5-9, 1999, P.R.China, pp. 497-502
- [Narendra] K.S.Narendra and S.Mukhopadhyay, *Adaptive control of nonlinear multivariable systems using neural networks*, *Neural Networks* 7, 737-752, 1994
- [Norgaard] M.Norgaard, O.Ravn, N.K.Poulsen and L.K.Hansen: *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems*, Springer – Verlag London Limited 2000
- [Ogunnaike] B.A.Ogunnaike, W.H.Ray, *Process Dynamics Modelling and Control*, Oxford University Press, NY, 1994
- [Sekaj99] Sekaj: *Genetic Algorithm-based Control System Design and System Identification*, Proceedings on the Int. Conference Mendel '99, June 9-12, 1999, Brno, Czech Republic, pp.139-144
- [Sekaj02] I.Sekaj, M.Foltin, M.Gonos: *Genetic Algorithm Based Adaptive Control of an Electromechanical MIMO System*, Proceedings of the GECCO 2002 Conference, July 9-13, 2002, New York, pp. 696

Robuste Regelung eines flexiblen Gelenkes mittels Zustandsregelung, Internal Model Control und Backstepping *

M. Glatzmayer, A. Viehweider

Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik

Gusshausstr. 27-29

A - 1040 Wien

Telefon +43 1 58801 376 24

Email: viehweider@acin.tuwien.ac.at

31.01.2005

Kurzfassung

Roboter spielen bei der Automatisierung von Prozessen in der Fertigung seit langem eine zentrale Rolle. Um steigenden wirtschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden, aber auch das Anwendungsgebiet von Robotern zu erweitern ist es sinnvoll, sich mit der Thematik von flexiblen Robotern zu beschäftigen. Im Gegensatz zu herkömmlichen starren Strukturen treten bei flexiblen Strukturen vermehrt unerwünschte Erscheinungen in den Vordergrund, beispielsweise störende elastische Moden. An einem Modell "SRV-02" der Firma Quanser, welches ein flexibles Gelenk eines Roboters nachbildet, werden verschiedene Reglerkonzepte untersucht und gegenübergestellt.

Abstract

Today robots can be found in many areas. To take increasing economic requirements into consideration and to expand the area of applicability of robots, it is important to learn more about flexible robots. In contrast to fixed structures flexible ones have the undesired characteristics of additional complex dynamics. By the use of a Quanser system named "SRV-02", which simulates a flexible joint, different control schemes are implemented, tested and discussed.

*Dieser Artikel ist Teil eines Projektes, welches von der Stadt Wien im Rahmen der Hochschuljubiläumsstiftung 2003 unterstützt wurde und den Kenntnisstand bezüglich geeigneter Regelalgorithmen erweitern soll. Es wird unter dem Namen "Robsys" am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik an der Technischen Universität Wien geführt.

1 Einleitung

Trends in der Herstellung von Industrierobotern stellen die Reduzierung des Gewichts derselben, sowie eine kostengünstigere Fertigung dar. Diese Entwicklungsziele führen dazu, dass Roboter Flexibilitäten aufweisen, sowohl in den einzelnen Verbindungsgliedern als auch in den Gelenken. Sinn und Zweck dieses Artikels soll die Gegenüberstellung vollkommen unterschiedlicher Entwurfsverfahren zur Regelung eines flexiblen Gelenkes sein.

Die drei betrachteten Methoden sind: Klassische Zustandsregelung [Sch96], mittels einer überlagerten PI-Ausgangsregelschleife, wobei letztere Robustheit gegenüber Parameterunsicherheiten garantieren soll; ein modellbasierter Ansatz (Internal Model Control) [MZ89], wobei die Differenz des Ausgangssignals des betrachteten Systems zu einem vorgegebenen Nominalmodell zur Regelung herangezogen wird und ein eigentlich für nichtlineare Systeme konzipiertes Entwurfsverfahren (Backstepping) [Vie04], das hier speziell für lineare Systeme adaptiert wird und zu einem nichtlinearen Regler für eine eigentlich (bei Vernachlässigung der Reibeffekte) lineare Strecke führt.

Die drei Verfahren sind von ihrer Entstehung vollkommen unterschiedlichen Jahrzehnten zuzuordnen, die Zustandsregelung ist in den 60´er Jahren, das Backstepping in den 90´er Jahren und Internal Model Control in den 70´er entstanden. Es werden die unterschiedlichen Verfahren hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, des Aufwands ihrer Implementierung, den Schwierigkeiten bei der Festlegung der Parametrierung, ihrer Empfindlichkeit und Robustheit gegenüber Änderungen der Streckenparametern, sowie ihrer Erweiterbarkeit verglichen. Industrieroboter werden wohl selten aus einem einzigen Gelenk bestehen, diese grundsätzlichen Untersuchungen sollen aus Ausgangspunkt für mehrachsige Systeme dienen.

2 Versuchsaufbau und Identifikation der Strecke

In Abb. 1 ist die modellhafte Nachbildung eines flexiblen Gelenkes ersichtlich, sowie die Festlegung des Winkel α , als Winkel zwischen Arm und drehbaren Aufsatz, des Winkel ϑ , als Winkel zwischen fest stehenden Stativ und dem Aufsatz, als auch Winkel $\gamma = \alpha + \vartheta$ als Gesamtwinkel. Um unterschiedliche Lastfälle untersuchen zu können wurde ein Behälter zur Aufnahme von Ringen auf dem Arm fixiert.

Das durch die Federn verursachte Drehmoment wird linearisiert, dabei ergibt sich eine im weiten Bereich gut mit der Realität übereinstimmende Beschreibung. Durch Ansatz der Euler-Lagrange-Gleichung gelangen wir zu folgendem Simulationsmodell der Strecke, siehe Abb. 2.

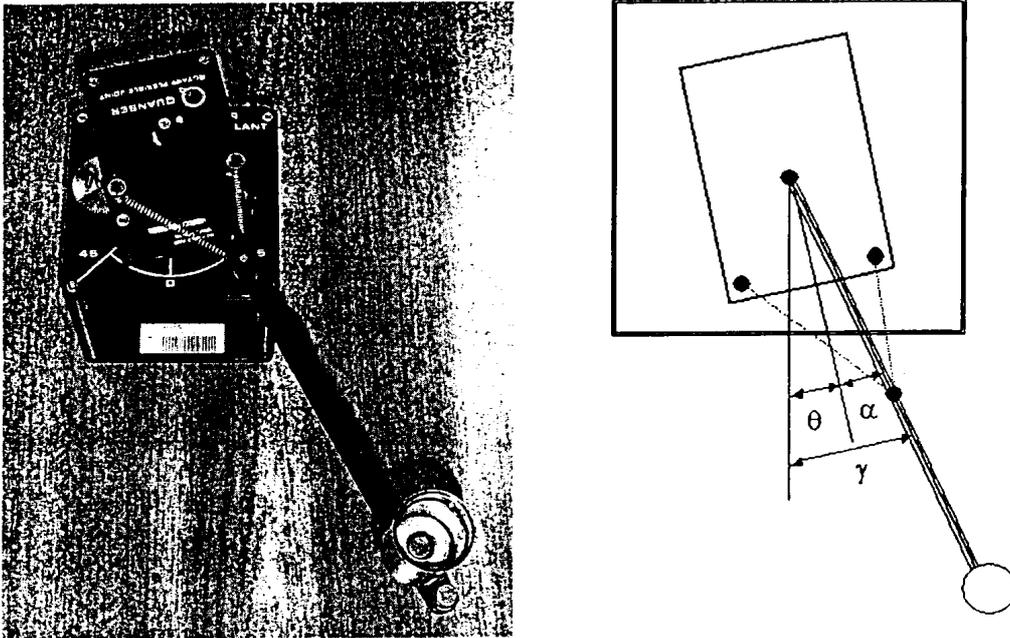


Abbildung 1: Das Streckenmodell des flexiblen Gelenkes

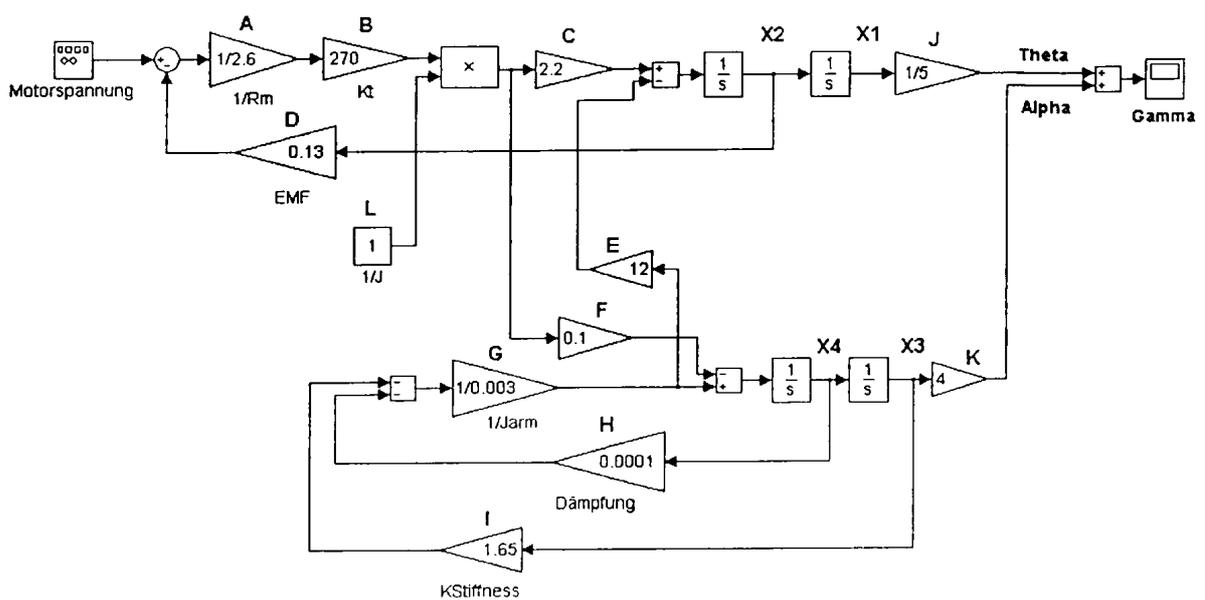


Abbildung 2: Simulinkmodell der Strecke

Die Bewegungsgleichungen werden auf folgende Systemmatrizen in der Zustandsraumdarstellung abgebildet, siehe [Wei95]:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ GI(\frac{EJ}{K} - 1) & GH(\frac{EJ}{K} - 1) & -GI(\frac{EJ}{K} - 1) & AB DL(\frac{FK}{J} - C) + GH(1 - \frac{EJ}{K}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{EGIJ}{K} & \frac{EGHJ}{K} & \frac{-EGIJ}{K} & -ABCDL - \frac{EGHJ}{K} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ ABL(CJ - FK) \\ 0 \\ ABCLJ \end{pmatrix} \quad \mathbf{c}^T = (1 \ 0 \ 0 \ 0) \quad d = (0) \quad (1)$$

unter Verwendung von $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u$ und $\mathbf{y} = \mathbf{c}^T\mathbf{x} + du$ mit den Zustandsvariablen $x_1 = \vartheta/J$, $x_2 = \dot{\vartheta}/J$, $x_3 = \alpha/K$ und $x_4 = \dot{\alpha}/K$, $y = \gamma$ und u der Motorspannung.

In Gl. (2) und Gl. (3) werden die Systemmatrizen sowie die Lage der Pol und Nullstellen für die Strecke ohne Last

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -360 & -0.02 & 360 & -3.48 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 540 & 0.03 & -540 & -38.53 \end{pmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5.38 \\ 0 \\ 59.23 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$P_1 = -26.83 \quad P_{2,3} = -5.83 \pm j23.51 \quad P_4 = 0 \quad N_{1,2} = 0.02 \pm j67.08$$

und für zwei Ringe Last

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -220 & -0.01 & 220 & -2.69 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 330 & 0.02 & -330 & -29.72 \end{pmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4.15 \\ 0 \\ 45.69 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$P_1 = -22.25 \quad P_{2,3} = -4.83 \pm j19.46 \quad P_4 = 0 \quad N_{1,2} = 0.01 \pm j55.53$$

beispielhaft angegeben. In Abb. 3 sind für vier Lastfälle, d.h. kein bis drei Ringe Last, die Verteilung der Pol und Nullstellen der Strecke angegeben sowie die Beladungsmöglichkeit des Arms. Die Pfeilrichtungen stehen dabei für die Bewegungsrichtung der Pol und Nullstellen im Sinne wachsender Ringanzahl.

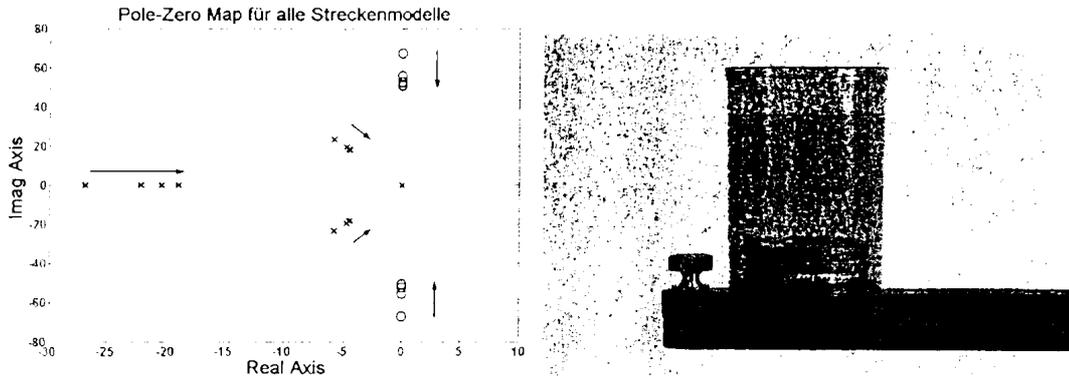


Abbildung 3: Pol und Nullstellen in Abh. vom Lastfall

3 Zustandsregelung mit PI-Ausgangsregelschleife

Bei einer Zustandsregelung mit PI-Ausgangsregelschleife wird die Zustandsrückführung der Strecke durch den PI-Regler erweitert, siehe [Sch96]. Zunächst gilt ganz allgemein:

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}}_I \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{c}^T & 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}_{Reg}} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (4)$$

Bei einem Reglerentwurf ist es meistens sinnvoll für die Spezifikation des gewünschten Einschwingverhaltens bestimmte Standard Übertragungsfunktionen zu verwenden die nach bestimmten Kriterien optimiert sind. An dieser Stelle wurde für die Vorgabe der Pole sogenannte Bessel-2 Übertragungsfunktionen verwendet, die ein fast aperiodisches Einschwingen mit fast keinem Überschwingen zeigen, wie in [Sch96] dargestellt. Da durch die weitere Zustandsgröße x_I die Ordnung des Systems von 4 auf 5 angehoben wird, muss das Bessel-2 Polynom für $n = 5$ herangezogen werden:

$$F(\bar{s}) = \frac{1}{(\bar{s} + 0,9264)(\bar{s} + 0,5906 \pm j0,9072)(\bar{s} + 0,8516 \pm j0,4427)}, \quad \bar{s} = \frac{s}{\omega}. \quad (5)$$

Der Parameter ω dient hier als Skalierungsfaktor mit dem die Pole in der linken s -Halbebene verschoben werden können. Mit Hilfe von MATLAB kann nun der Rückführvektor \mathbf{R}_x derart bestimmt werden, damit die Pole des geschlossenen Regelkreises in erster Linie mit den vorgegeben Polen übereinstimmen. Dabei wird die Matrix \mathbf{A}_{Reg} sowie die Matrix \mathbf{b} und ein Vektor übergeben der die Vorgabepole beinhaltet. Der Ergebnisvektor besitzt die Form $\mathbf{k}_{ges}^T = (\mathbf{k} \ K_I)$. Somit ist in das Integralglied K_I und der Rückführvektor \mathbf{R}_x unabhängig von Proportionalglied R_p bestimmt. Durch eine Wahl von R_p ergibt sich ein neues $\mathbf{R}_x = \mathbf{k} - R_p * \mathbf{c}$.

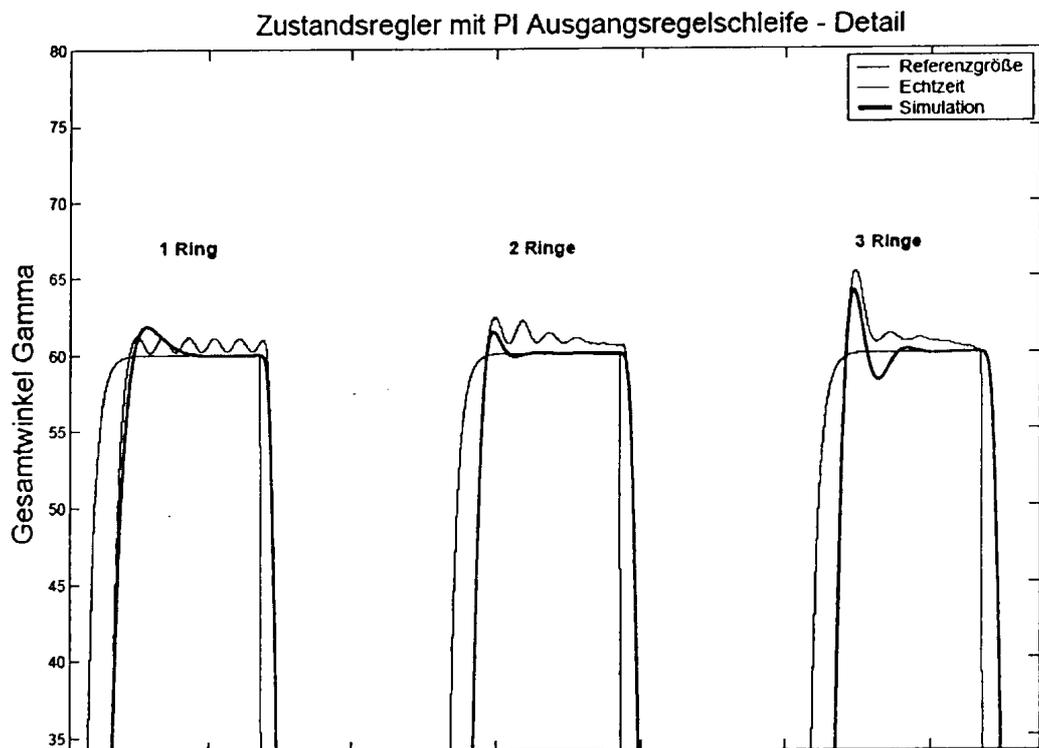


Abbildung 4: Detailstudie des Regelverhaltens

Der Aspekt der Robustheit wurde bei der Parameteroptimierung dadurch berücksichtigt, indem das Minimum des akkumulierten Fehlerwertes für ein und die selbe Parameterkonfiguration über alle drei Lastfälle gesucht wurde. Dieses Fehlermaß wurde festgelegt als das Integral über dem Quadrat der Differenz zwischen Echtzeit und Referenzgröße. Ein günstiges Regelverhalten ergibt sich für die Werte $\omega = 10.5$ und $R_P = 1$. In Abb. 4 ist das Regelverhalten bei verschiedenen Lastfällen gezeigt, an dieser Stelle ist die Reibung noch nicht berücksichtigt.

Die durch das Getriebe und die Gleitlager des Motors verursachte Reibung wird mit Hilfe des **Dual State Friction (DSF)** Modells aus [SB01] beschrieben, siehe Abb. 5.

Dieses Reibungsmodell berücksichtigt die geschwindigkeitsabhängige Gleitreibungskraft (Reibung nach Stribeck) und das elastische Verhalten im Haftreibungsbereich. Das besondere an diesem Modell ist der kontinuierliche Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung, dies wird erreicht durch eine zustandsabhängige Umschaltstrategie. Nach Identifikation der erforderlichen Reibungs-Parameter der Strecke, wird das Reibungsmodell dem Regler aufgeschaltet. Wie man in der Abb. 6 erkennt ist eine wesentliche Verbesserung des Regelverhaltens erzielt worden. An dieser Stelle soll auch erwähnt werden, dass das Reibmodell für sich ein nichtlineares System darstellt. Bei Überkompensation besteht eventuell die Gefahr der Instabilität.

4 Internal Model Control

Der allgemeine Aufbau einer Struktur nach **Internal Model Control**, liegt in einer parallelen Aufschaltung eines mathematischen Streckenmodells zur eigentlichen physikalischen Strecke, siehe [MZ89]. Der Entwurf eines **IMC-Reglers** gliedert sich dabei in zwei grundlegende Schritte:

Im ersten Schritt wird zuerst für SISO Systeme ein H_2 optimaler Regler \tilde{q} für ein ausgewähltes Eingangssignal v bestimmt, wobei auf ein gutes Ansprechverhalten geachtet wird ohne dabei Beschränkungen der Stellgröße sowie Unsicherheiten in Modellparametern zu berücksichtigen. Im zweiten Schritt wird die Robustheit erreicht durch Erweiterung des Reglers \tilde{q} durch einen Tiefpassfilter f zu $q = \tilde{q} \cdot f$.

Obwohl in [MZ89] der Entwurf für stabile und instabile Strecken gezeigt wird und die vorliegende Strecke als grenzstabil zu bezeichnen ist, soll an dieser Stelle nur der Entwurf für den Fall einer stabilen Regelstrecke gezeigt werden. Bei Betrachtung der Theorie zeigen sich Schwierigkeiten beim Entwurf des Reglers im Falle grenzstabiler Strecken, weil das Entwurfsverfahren Realteile von Pol und Nullstellen der Regelstrecke ungleich Null verlangt. Als Lösung für dieses Problem wird daher die grenzstabile Strecke mit Hilfe einer Zustandsrückführung für sich stabilisiert und diese rückgekoppelte Strecke als neue Strecke für den Reglerentwurf herangezogen, siehe Abb. 7.

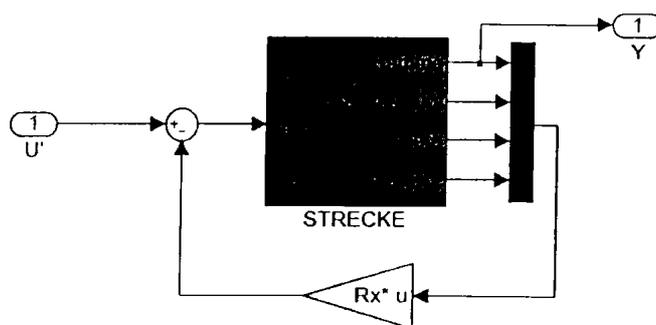


Abbildung 7: Strecke mit Zustandsrückführung

Mit Hilfe von Bessel-2 Polynome vierter Ordnung wird die Lage der Polstellen in Abhängigkeit des Parameters ω für die rückgekoppelte Strecke vorgegeben, die Funktion eines Bessel-2 Polynoms vierter Ordnung, wie in [Sch96] angegeben, lautet:

$$F(\bar{s}) = \frac{1}{(\bar{s} + 0,6573 \pm j0,8302)(\bar{s} + 0,9047 \pm j0,2711)}, \quad \bar{s} = \frac{s}{\omega}. \quad (6)$$

Bei einer geeigneten Wahl des Parameters $\omega = 30$ werden die Pole der Strecke, wie in Abb. 8 linkes Bild dargestellt, verschoben.

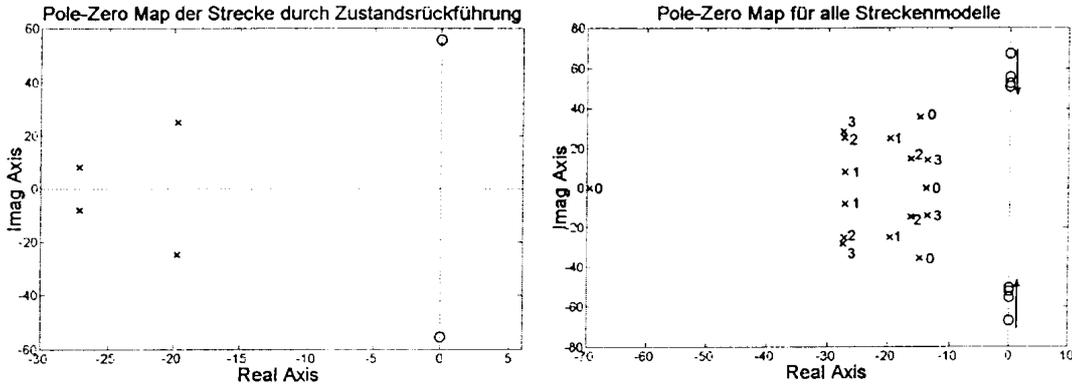


Abbildung 8: Pol und Nullstellenverteilung durch Zustandsrückführung

Bei der Untersuchung verschiedener Lastfälle, speziell keinen bis drei Ringe Last, ergeben sich neue Pol und Nullstellenverteilungen für die rückgekoppelte Strecke, siehe Abb. 8 rechtes Bild. Unter der Bedingung das die Strecke \tilde{p} stabil ist, wobei \tilde{p} das Streckenmodell beschreibt, wird \tilde{p} aufgespalten in einen Allpassanteil \tilde{p}_A und in einen Minimumphasenanteil \tilde{p}_M , es gilt also $\tilde{p} = \tilde{p}_A \tilde{p}_M$ wobei \tilde{p}_A alle Nullstellen der Strecke die in der rechten s-Halbebene liegen beinhaltet, außerdem muss gelten $|\tilde{p}_A(j\omega)| = 1$ für alle Werte von ω . Im vorliegenden Fall besitzt \tilde{p}_A dann die Form:

$$\tilde{p}_A(s) = \frac{(n_1 - s)(n_2 - s)}{(n_1 + s)(n_2 + s)} \quad (7)$$

wenn n_i die i-te Nullstelle beschreibt und \tilde{p}_M gleich

$$\tilde{p}_M(s) = \frac{(n_1 + s)(n_2 + s)}{(p_1 - s)(p_2 - s)(p_3 - s)(p_4 - s)} \quad (8)$$

wenn p_i die i-te Polstelle angibt. Beim IMC-Entwurfsverfahren wird der Regler auf ein ausgewähltes Eingangssignal v abgestimmt. Dieses Signal wird ebenfalls zerlegt in einen Allpassanteil v_A und in einen Minimumphasenanteil v_M , somit gilt ebenfalls $v = v_A v_M$. Laut [MZ89] wird dann der Regler \tilde{q} mit dem Ausdruck

$$\tilde{q} = (\tilde{p}_M v_M)^{-1} \{ \tilde{p}_A^{-1} v_M \}_* \quad (9)$$

bestimmt, wobei der Operator $\{.\}_*$ folgendes bedeutet: nach einer Partialbruchzerlegung des Operators werden jene Term unterdrückt die die gleichen Pole besitzen wie jene von \tilde{p}_A^{-1} . Im vorliegenden Fall wurde ein Eingangssignal $v = \frac{1}{\tau s + 1}$ gewählt, somit ergibt sich für den Regler

$$\tilde{q} = (\tilde{p}_M \tilde{p}_A)^{-1} \Big|_{s = -\frac{1}{\tau}} \quad (10)$$

Bei dieser Wahl des Eingangssignals reduziert sich der Ausdruck auf eine Konstante. Im nächsten Schritt wird der sogenannte IMC-Filter entworfen, es bietet sich ein Filter der Form

$$f(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (11)$$

an, wobei n derart groß gewählt wird damit der Grad des Nenners von $q = \tilde{q}f$ größer und oder gleich als der Grad des Zählers von q ist, der Parameter λ hingegen ist ein frei wählbarer Filterparameter, in dieser Anwendung wurde $n = 3$ gewählt.

Abb. 9 zeigt ein typisches Regelverhalten für den IMC-Regler, das mathematische Streckenmodell wurde auf einen Ring Last normiert.

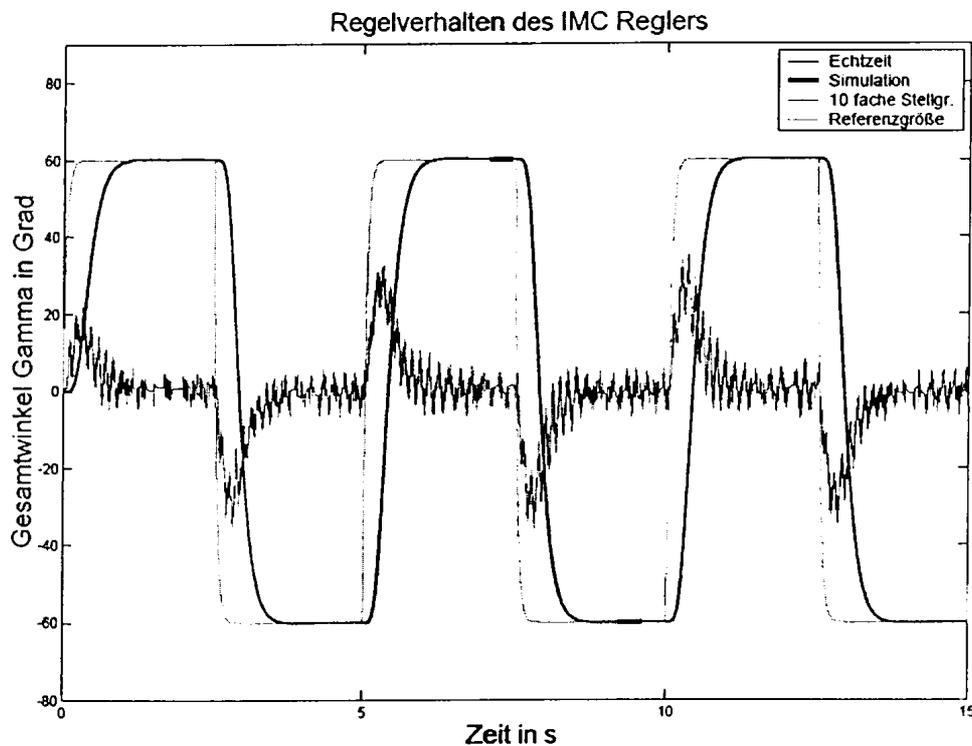


Abbildung 9: Regelverhalten des IMC-Reglers

Abb. 10 zeigt eine Untersuchung von verschiedenen Lastfällen. Obwohl die Strecke auf einen Ring Last normiert wurde, ergeben sich erstaunlicher Weise selbst bei vier oder fünf Ringen Last eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Echtzeit.

Für gewählte Werte von $\omega = 30$, $\tau = 0.05$ und $\lambda = 0.1$ ergeben sich die Parameter

$$\tilde{q} = 20.859 \quad f(s) = \frac{1}{0.001 s^3 + 0.03 s^2 + 0.3 s + 1.0} \quad (12)$$

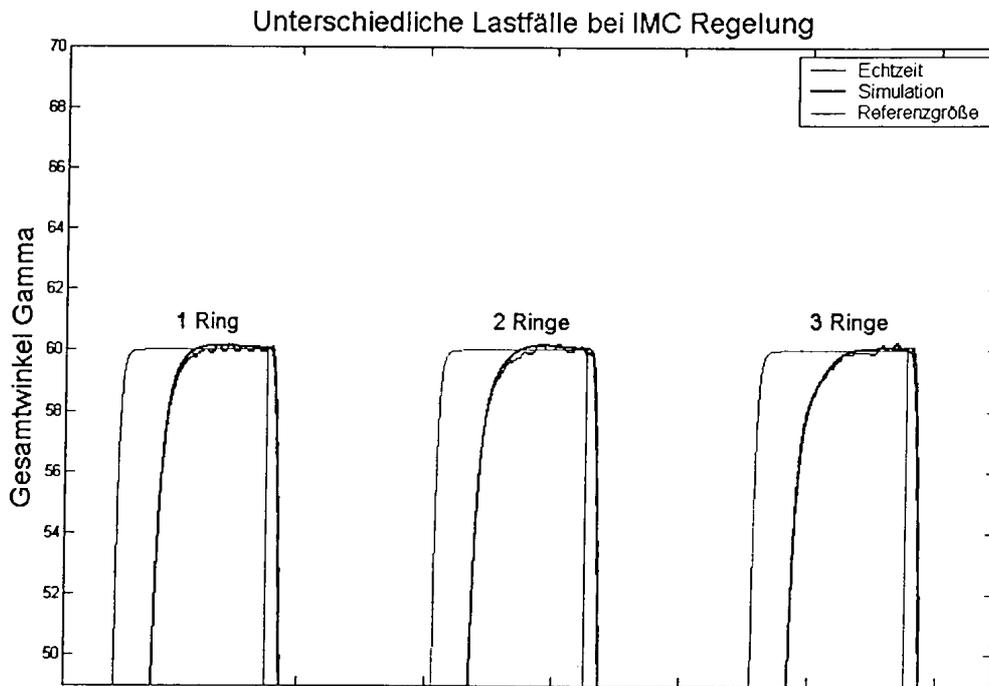


Abbildung 10: Untersuchung von Lastfällen

5 Der Backstepping Entwurf

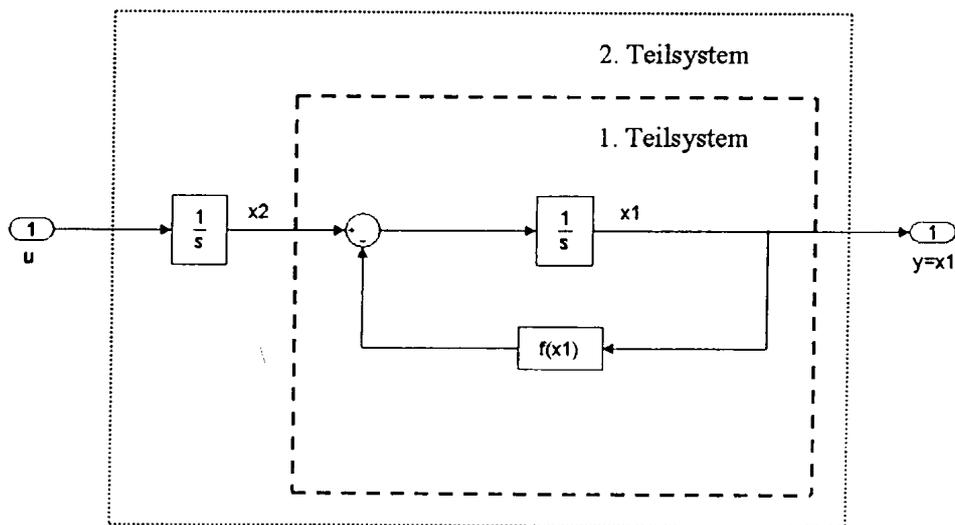


Abbildung 11: Beispiel einer Strecke zur Herleitung der Backstepping-Entwurfsmethodik

Backstepping ist ein rekursives Entwurfsverfahren für Strecken in "strict-feedback" Form. Wesentliche Elemente dieses Verfahrens stellen die Einführung von virtuellen Regelgeset-

zen und virtuellen Eingängen dar. Die prinzipielle Vorgehensweise soll an einer Strecke laut Abb. 11 eingeführt werden. Es wird hierbei eine Tracking-Regelung für den Systemausgang $y = x_1$ betrachtet. Hierzu wird der Trackingfehler

$$z_1 = y - y_{ref} = x_1 - y_{ref} \quad (13)$$

eingeführt. Die Ableitung desselben führt zu

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_{ref} = x_2 - f(x_1) - \dot{y}_{ref}. \quad (14)$$

Wir betrachten x_2 als den Eingang für das 1.Teilsystem laut Abb. 11. Da dieser nicht unmittelbar beeinflussbar ist, sondern nur mittelbar über einen Integrator durch den Systemeingang u , wird er als virtueller Eingang für das 1.Teilsystem bezeichnet. Könnte dieser virtuelle Eingang unmittelbar beeinflusst werden, so ließe sich unmittelbar ein Regelgesetz* angeben, mit dem das 1.Teilsystem stabilisiert werden könnte:

$$x_2 = f(x_1) + \dot{y}_{ref} - c_1 z_1 \quad \text{mit} \quad c_1 > 0, \quad (15)$$

wobei c_1 einen Reglerparameter darstellt, damit würde sich ergeben

$$\dot{z}_1 = -c_1 z_1 \quad \text{mit} \quad c_1 > 0. \quad (16)$$

x_2 lässt sich aber nicht unmittelbar beeinflussen, wir legen Gl. (15) als virtuelles Regelgesetz α_1 für das 1.Teilsystem fest, also

$$\alpha_1 = f(x_1) + \dot{y}_{ref} - c_1 z_1 \quad (17)$$

und bezeichnen mit z_2 die Differenz zwischen dem virtuellen Systemeingang x_2 und dem virtuellen Regelgesetz für das 1.Teilsystem. Wir bezeichnen in Zukunft die einzelnen z_i als Backstepping-Koordinaten. Dies ergibt

$$\begin{aligned} z_2 &= x_2 - \alpha_1 = x_2 - f(x_1) - \dot{y}_{ref} + c_1 z_1 \\ \dot{z}_1 &= -c_1 z_1 + z_2. \end{aligned} \quad (18)$$

Damit sind die wesentlichen Begriffe geklärt. Da das Verfahren rekursiv ist, wird der nächste Schritt darin bestehen z_2 abzuleiten

*Wobei festgehalten werden soll, dass dies nur ein mögliches Regelgesetz im Sinne der Backstepp-Entwurfsmethodik darstellt. Die exakte Kompensierung von Nichtlinearitäten ist aus Robustheitsgründen eigentlich nicht erwünscht, es wird daher meist eine Dominierung angewendet, siehe [Här05].

$$\begin{aligned}\dot{z}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = u - f'(x_1)\dot{x}_1 - \ddot{y}_{ref} + c_1\dot{z}_1 \\ &= u - f'(x_1)(x_2 - f(x_1)) - \ddot{y}_{ref} + c_1(-c_1z_1 + z_2)\end{aligned}\quad (19)$$

wobei u der virtuelle Eingang des 2. Teilsystems ist und gleichzeitig der Systemeingang. Das ist ein Kennzeichen des letzten Rekursionsschrittes. Durch u lässt sich nun eine vorteilhafte Dynamik für z_2 vorgeben, die Wahl

$$u = f'(x_1)x_2 - f'(x_1)f(x_1) + \ddot{y}_{ref} + c_1^2z_1 - c_1z_2 - c_2z_2 - z_1 \quad (20)$$

führt zu

$$\dot{z}_2 = -c_2z_2 - z_1 \quad \text{mit} \quad c_2 > 0. \quad (21)$$

Die Gesamtdynamik ist also

$$\dot{\mathbf{z}} = \begin{pmatrix} -c_1 & 1 \\ -1 & -c_2 \end{pmatrix} \mathbf{z} = \mathfrak{B}\mathbf{z}. \quad (22)$$

Die Stabilität lässt sich mittels der Eigenwerte der Matrix \mathfrak{B} oder der Lyapunovfunktion $V = \frac{1}{2}\mathbf{z}^T\mathbf{z}$ überprüfen. Die Einschränkung auf Systeme in "unterer Dreiecksform" (strict-feedback-systems) ist eine harte Anforderung. Viele in der Praxis auftretende elektromechanische Systeme erfüllen diese Anforderungen nicht. So auch das betrachtete flexible Gelenk. Wir werden versuchen, durch geeignete Maßnahmen diese Einschränkung zu umgehen. Motivation derselben stellen die erzielten Ergebnisse aus Simulation und Echtzeit dar. Die analytische Beweisführung ist in diesem Schriftstück ausgeklammert und wird Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Das flexible Gelenk weist folgende Streckentopologie auf:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & \mathbf{a}_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{b}_2 \\ 0 \\ b_4 \end{pmatrix} u, \quad (23)$$

wobei jene Einträge in der Systemmatrix und dem Einkoppelvektor hervorgehoben sind, die eine Verletzung der strict-feedback-Form darstellen.

Insgesamt lässt sich der Ansatz wie folgt beschreiben:

1. Einführen der Backstepping-Koordinaten z_1 , z_2 , z_3 und z_4 (Differenz zwischen den virtuellen Inputs x_i und den virtuellen Regelgesetzen α_i):

$$z_1 = x_1 - x_{1,ref}, \quad z_2 = x_2 - \alpha_1, \quad z_3 = x_3 - \alpha_2, \quad z_4 = x_4 - \alpha_3 \quad (24)$$

2. Ableiten der Backstepping-Koordinaten führt zu:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{x}_{1,ref} = x_2 - \dot{x}_{1,ref} \\ \dot{z}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 \\ \dot{z}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2 \\ \dot{z}_4 &= \dot{x}_4 - \dot{\alpha}_3\end{aligned}\quad (25)$$

3. Festlegung der virtuellen Regelgesetze durch folgende gewünschte Dynamik des Gesamtsystems:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= -c_1 z_1 + z_2 \\ \dot{z}_2 &= -c_2 z_2 + z_3 - z_1 \\ \dot{z}_3 &= -c_3 z_3 + z_4 - z_2 \\ \dot{z}_4 &= -c_4 z_4 - z_3\end{aligned}\quad (26)$$

wobei die c_i Reglerparameter mit $c_i > 0$ sind. Vergleich mit den Ableitungen der Backstepping-Koordinaten aus Gl. (26), dies führt zu folgendem ersten virtuellen Regelgesetz:

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 + \dot{x}_{1,ref}.\quad (27)$$

Aus $\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1$, $\dot{z}_2 = -c_2 z_2 + z_3 - z_1$, Gl. (23) und Gl. (27) folgt

$$u = -\frac{1}{b_2}(a_{21}x_1 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + (c_1^2 + 1)z_1 + (c_1 + c_2)z_2 - z_3 - \ddot{x}_{ref}).\quad (28)$$

Aus $\dot{z}_3 = \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2$, $\dot{z}_4 = \dot{x}_4 - \dot{\alpha}_3$, $\dot{z}_3 = -c_3 z_3 + z_4 - z_2$, $\dot{z}_4 = -c_4 z_4 - z_3$ und Gl. (23) folgt

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_2 &= x_4 + z_2 + c_3 z_3 - z_4 \\ \dot{\alpha}_3 &= a_{41}x_1 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4 + z_3 + c_4 z_4 + b_4 u.\end{aligned}\quad (29)$$

Aus Gl. (24), Gl. (27), Gl. (28) und Gl. (29) ergeben sich die Systemgleichungen des dynamischen Reglers. Die Ausregelung des Gesamtwinkels $\gamma = x_1$ in der Echtzeit erfolgt wunschgerecht, dennoch zeigt sich eine störende Dynamik im Winkel $\alpha = x_3$ in Form von Oszillationen, welche im hochfrequenten Verlauf der Grösse x_4 begründet liegt. Daher wird ein neuer Zustand x_5 eingeführt, der im wesentlichen eine tiefpassgefilterte Version von x_4 darstellt.

$$\dot{x}_5 = -\frac{1}{T}x_5 + x_4.\quad (30)$$

Dieser Ansatz zeigte in der Simulation eine deutliche Verbesserung der Stellgrößendyna-

mik und somit des Regelverhaltens und wurde anschliessend durch die Echtzeit bestätigt. Natürlich ist die Auswirkung dieses Filters auf die Stabilität anhand der Lyapunovfunktion analytisch zu überprüfen und soll aufgrund des Umfangs an anderer Stelle erfolgen. Es ergibt sich somit folgendes Regelgesetz:

$$u = -\frac{1}{b_2}(a_{21}x_1 + a_{23}x_3 + a_{24}x_5 + (c_1^2 + 1)z_1 + (c_1 + c_2)z_2 - z_3 - \ddot{x}_{ref}). \quad (31)$$

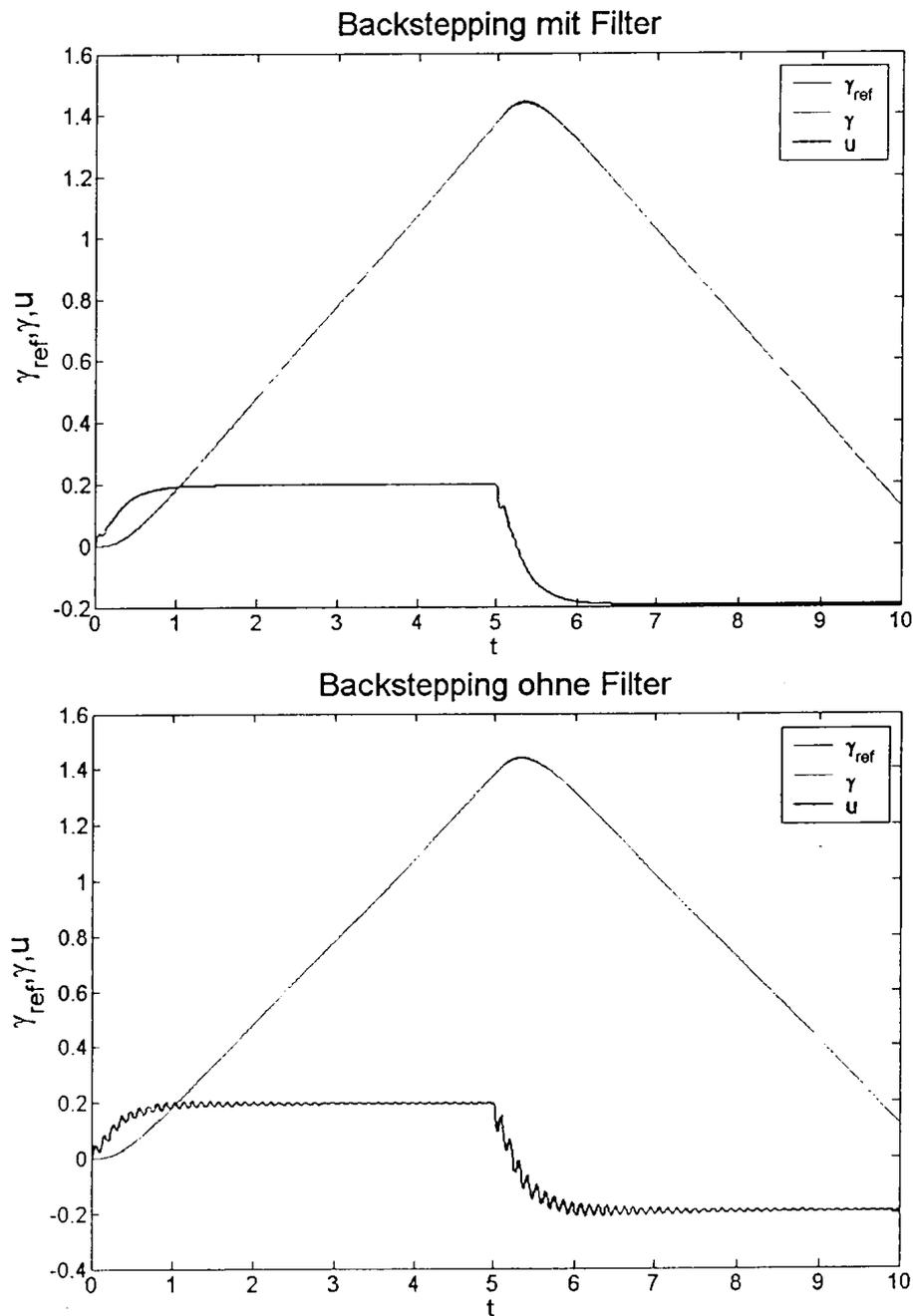


Abbildung 12: Backstepping mit und ohne Filter

Abb. 12 zeigt den sich ergebenden Stellgrößenverlauf beim Tracking des Backstepping Reglers mit und ohne Filter. Aufbauend auf einen fertigen Regler wurde eine Parameteroptimierung durchgeführt, es ergibt sich ein günstiges Regelverhalten für:

$$c_1 = 12.5 \quad c_2 = 0.1 \quad c_3 = 150 \quad c_4 = 10 \quad T = 0.8 \quad (32)$$

5.1 Robuste Erweiterung des Verfahrens

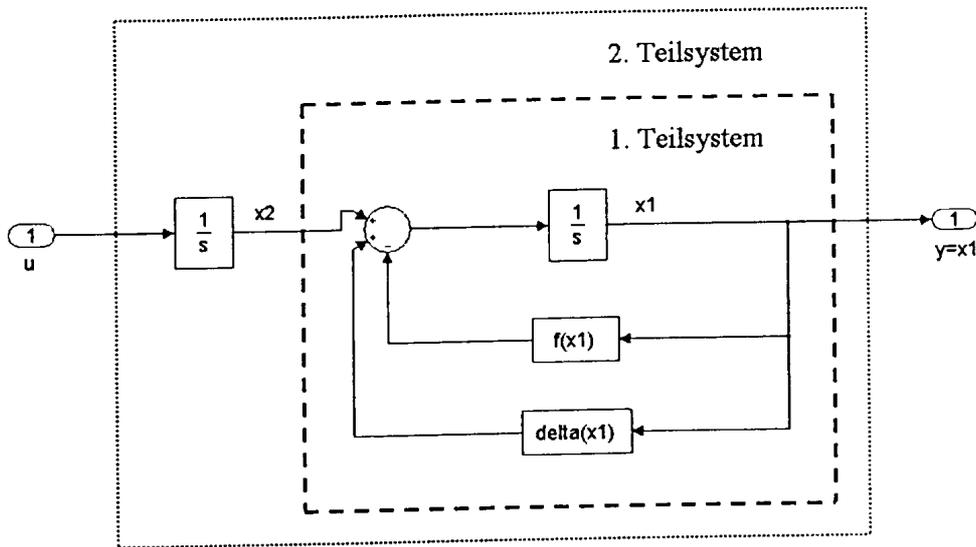


Abbildung 13: Strecke zur Herleitung der robusten Backstepping-Entwurfsmethodik

Zur Beschreibung des robusten Backsteppings wird das System aus Abb. 11 um eine Unsicherheit $\Delta(x_1)$ erweitert, siehe Abb. 13.

Ausgehend von Gl. (13) ergibt sich

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_{ref} = x_2 - f(x_1) - \dot{y}_{ref} + \Delta(x_1). \quad (33)$$

Es sei eine Schranke Δ_{max} der Unsicherheit bekannt, wobei gilt

$$|\Delta(x_1)| < \Delta_{max}(x_1). \quad (34)$$

Es wird das erste virtuelle Regelgesetz Gl. (17) modifiziert zu

$$\alpha_1 = f(x_1) + \dot{y}_{ref} - c_1 z_1 - \text{sign}(z_1) \Delta_{max}(x_1). \quad (35)$$

Dies führt zu folgender Ableitung der ersten Backstepping-Koordinate

$$\dot{z}_1 = -c_1 z_1 + \Delta(x_1) - \text{sign}(z_1) \Delta_{max}(x_1) + z_2. \quad (36)$$

Die Ableitung der Lyapunovfunktion

$$V = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (37)$$

führt zu

$$\dot{V} = z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -c_1 z_1^2 + z_1 \Delta(x_1) - z_1 \text{sign}(z_1) \Delta_{max}(x_1) + z_1 z_2 \quad (38)$$

wobei immer gilt dass $z_1 \Delta(x_1) - z_1 \text{sign}(z_1) \Delta_{max}(x_1) \leq 0$ ist. Somit wird die Stabilität des ersten Teilsystems durch das erste virtuelle Regelgesetz gewährleistet. Der Regelentwurf wird anschließend in konsequenter rekursiver Form weitergeführt, siehe [Vie04].

Da in den höheren Rekursionschritten der Backstepping-Methodik Ableitungen der virtuellen Regelgesetze von Nöten werden, wird statt der Signum-Funktion, deren erste Ableitung nicht existiert, eine sigmoide Funktion, die mittels ϖ parametrisiert wird, verwendet. Die konkrete Bestimmung von ϖ , zur Dominierung der Unsicherheiten, richtet sich an der Stellgrössendynamik. Im Falle einer sigmoiden Funktion ist die Konvergenz gegen den Ursprung des Zustandsraums nicht garantiert, jedoch ergibt sich eine "Ultimate Bounded"-Stabilität.

Für den Fall der hier betrachteten Strecke eines flexiblen Gelenks werden die Unsicherheiten in den einzelnen Differentialgleichungen wie folgt geeignet beschrieben:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + \Delta_1(x_1, x_3, x_4) + (b_2 + \Delta_2)u \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= a_{41}x_1 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4 + \Delta_3(x_1, x_3, x_4) + (b_4 + \Delta_4)u. \end{aligned} \quad (39)$$

Zur Auslegung des Reglers werden die maximalen Unsicherheiten berechnet, diese setzen sich wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} |\Delta_1, max| &= |\Delta a_{21, max}| |x_1| + |\Delta a_{23, max}| |x_3| + |\Delta a_{24, max}| |x_4| \\ |\Delta_3, max| &= |\Delta a_{41, max}| |x_1| + |\Delta a_{43, max}| |x_3| + |\Delta a_{44, max}| |x_4|. \end{aligned} \quad (40)$$

Weiters sei $|\Delta_2, max|$ und $|\Delta_4, max|$ bekannt. Mit Kenntnis dieser Schranken wird der robuste Regelentwurf vollzogen. Die Herleitung des ersten virtuellen Regelgesetzes ist ident

mit dem Regelentwurf für den Nominalfall, die restliche Herleitung ist hingegen durch den robusten Entwurf stark verschieden. Durch Anwendung der in diesem Kapitel 5.1 eingeführten Methodik ergeben sich die Reglergleichungen:

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 - x_{1,ref} \\ z_2 &= x_2 - \alpha_1 \\ z_3 &= x_3 - \alpha_2 \\ z_4 &= x_4 - \alpha_3 \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \dot{y}_{ref} - c_1 z_1 \\ \alpha_2 &= c_3 z_3 + z_2 + \alpha_3 \\ \dot{\alpha}_3 &= a_{41} x_1 + a_{43} x_3 + a_{44} x_4 + b_4 u + c_4 z_4 + z_3 + \text{sign}(z_4, \varpi_2) (\Delta_{3,max} + \Delta_{4,max} |u|) \end{aligned}$$

$$u = -\frac{1}{b_2} (a_{21} x_1 + a_{23} x_3 + a_{24} x_4 + c_2 z_2 - z_3 + z_1 + \text{sign}(z_2, \varpi_1) (\Delta_{1,max} + \Delta_{2,max} |u|))$$

wobei $\Delta_{2,max}$ relativ klein ist und deshalb vernachlässigt wird, damit ergibt sich für die Stellgröße:

$$u = -\frac{1}{b_2} (a_{21} x_1 + a_{23} x_3 + a_{24} x_4 + c_2 z_2 + z_1 + \text{sign}(z_2, \varpi_1) \Delta_{1,max} - z_3). \quad (42)$$

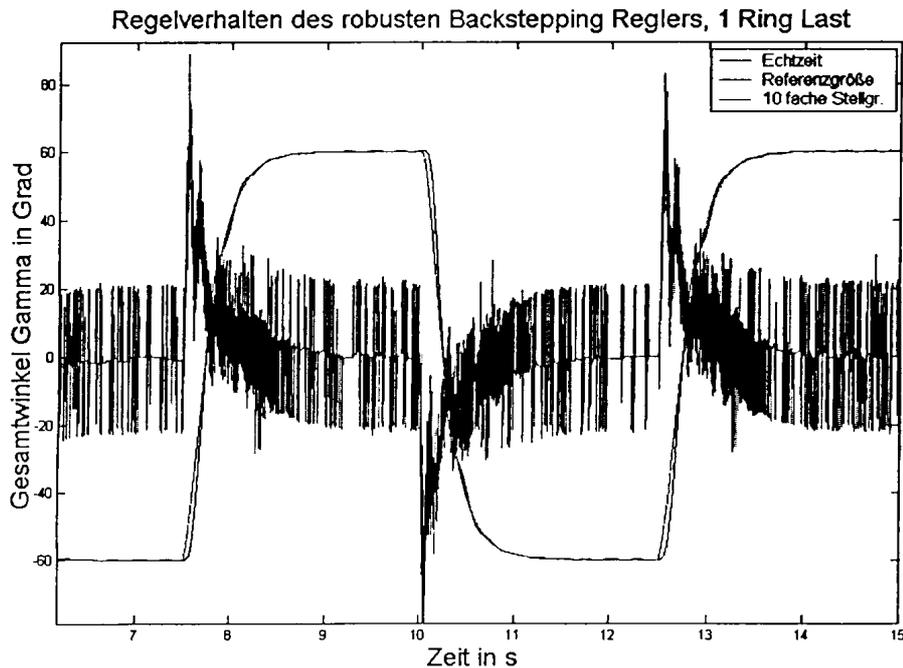


Abbildung 14: Regelverhalten bei robustem Backstepping

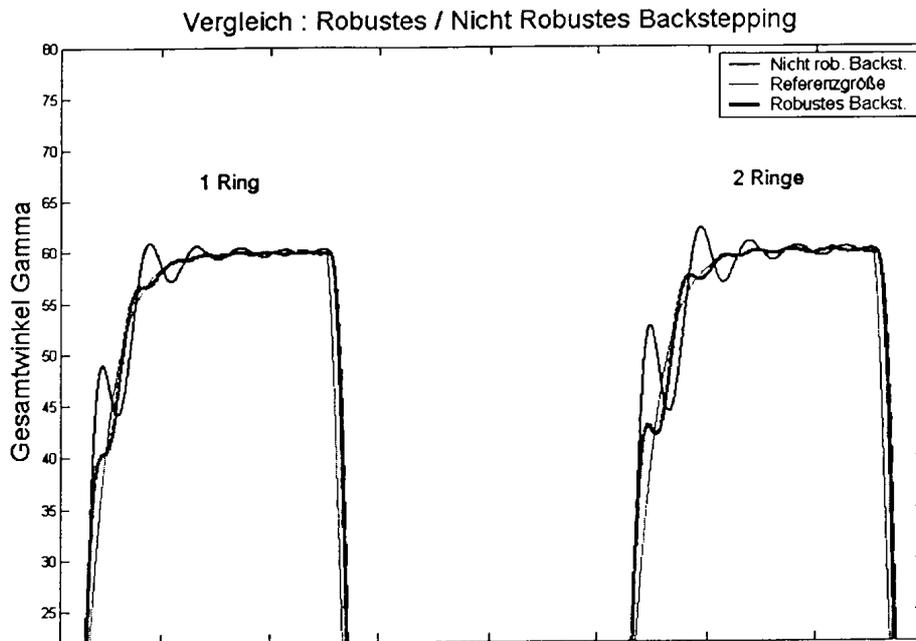


Abbildung 15: Vergleich zw. robustem und nicht robustem Backstepping

Abb. 14 zeigt das typische Regelverhalten, die Abb. 15 hingegen die wesentliche Verbesserung des Regelverhaltens durch robustes Backstepping, bei gewählten Werten von $c_1 = 12.5, c_2 = 0.1, c_3 = 150, c_4 = 10, T = 0.8, \varpi_1 = 10$ und $\varpi_2 = 12$.

Echtzeit: Backstepping-Koordinaten für robusten Backstepping Regler, 1 Ring Last

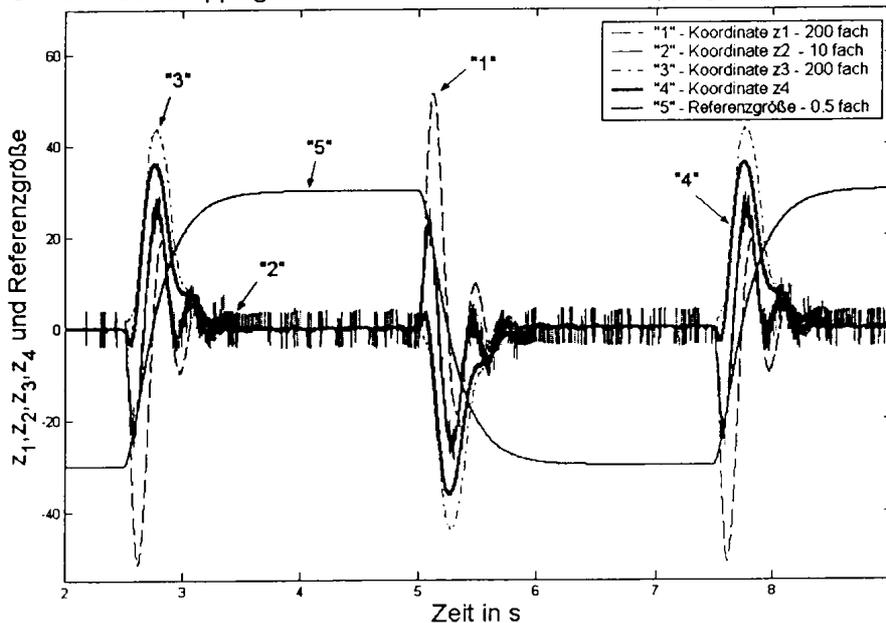


Abbildung 16: Backstepping-Koordinaten z_1, z_2, z_3 und z_4 in der Echtzeit

Abb. 16 zeigt das Verhalten der Backstepping Koordinaten im Falle des robusten Backstep-

pings in der Echtzeit und Abb. 17 hingegen in der Simulation.

Simulation: Backstepping-Koordinaten für robusten Backstepping Regler, 1 Ring Last

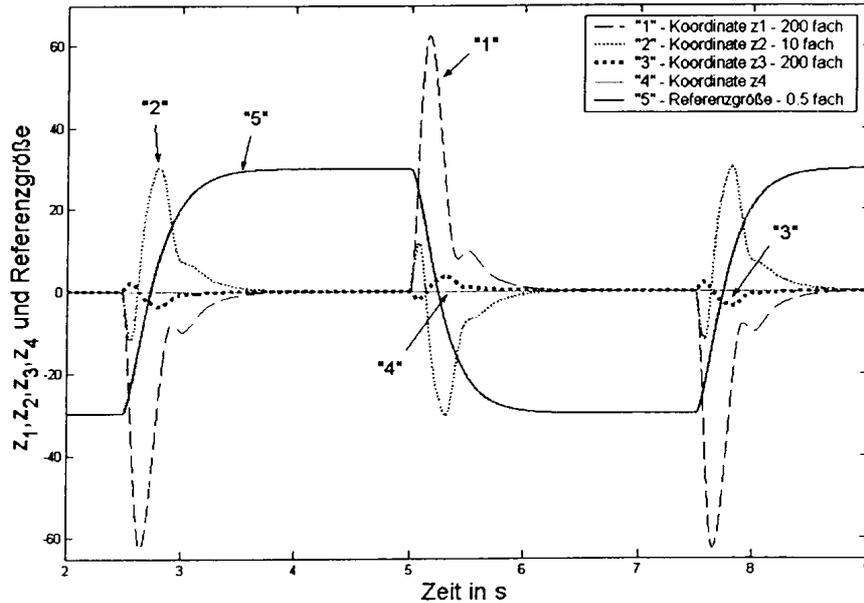


Abbildung 17: Backstepping-Koordinaten z_1 , z_2 , z_3 und z_4 in der Simulation

6 Zusammenfassung und Bewertung der einzelnen Verfahren

Abb. 18 zeigt eine Gegenüberstellung aller erwähnten Reglertypen. Zu erwähnen ist, dass alle **drei** Regler auf **einen Ring Last** normiert und mit dem gleichen Eingangssignal angesteuert wurden.

Die **Angabe** eines Robustheitsmasses, um alle drei Reglerentwurfsmethoden gerecht untereinander vergleichen zu können, scheint hier nicht angebracht, da die Reaktion der Regler auf Parameterschwankungen der Strecke zu unterschiedlich ausfällt. Daher sollte ein **solches** Mass für jeden Regler selbst bestimmt und angewendet werden.

Im **Falle** des Zustandsreglers mit **PI-Ausgangsregelschleife** zeigt sich ein recht empfindliches Regelverhalten bzgl. der Überschwingweite in Abhängigkeit von der Beladung. Daher **scheint** ein Robustheitsmass, welches diese spezielle Abhängigkeit beschreibt, als **besonders** sinnvoll.

Gänzlich anderes Regelverhalten zeigt der Regler nach **Internal Model Control**. Reaktionen bzgl. Parameterschwankungen zeigen sich in der Ausregelzeit, sodass ein mögliches Robustheitsmass welches das Zeitintegral des Quadrates der Differenz zwischen Referenzgröße und Echtzeit bestimmt, sinnvoll. Hier wäre also eine Betrachtung der Überschwingweite als Robustheitsmass weniger angebracht.

Gegenüberstellung: Zustandsregler, Robustes Backstepping und IMC, 2 Ringe Last

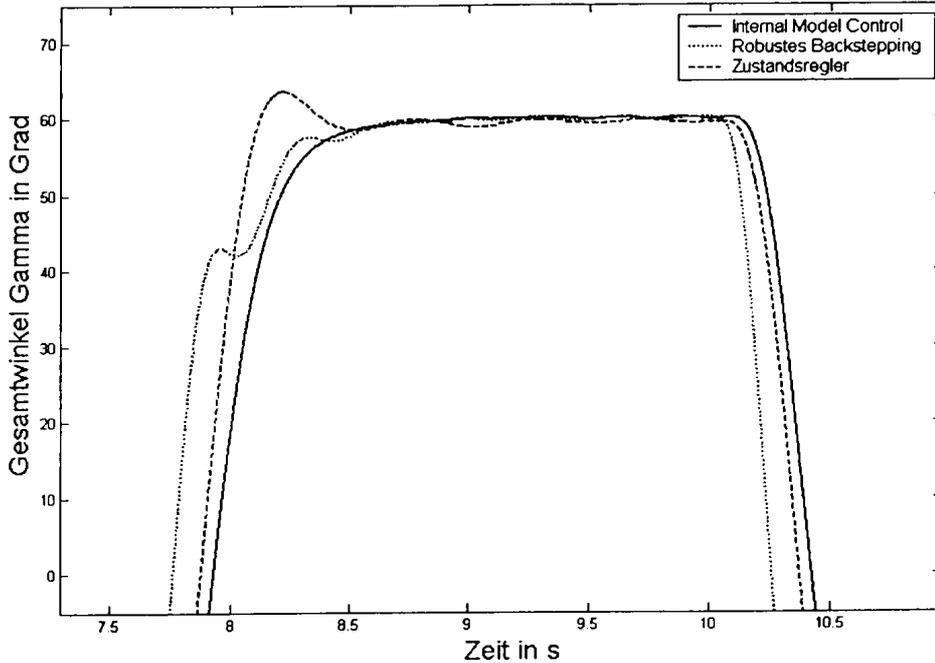


Abbildung 18: Gegenüberstellung aller Regler für zwei Ringe Last

Ähnliches Regelverhalten zeigt der **Backstepping** Regler in robuster Auslegung. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass der Backstepping Regler auf eine zulässige Parameterschwankung von einem Ring ausgelegt wurde. Auch hier zeigen sich Veränderungen des Regelverhaltens aufgrund Parameterschwankungen der Strecke nur in einer Abweichung von der Referenzgröße und nicht in der Überschwingweite. Somit scheint ein dem Internal Model Control gleiches Robustheitsmass angebracht.

	Reglertyp	Aufwand der Implementierung	Stellgröße Frequenz	Stellgröße Amplitude	Eignung zum Tracking	Reibungs-kompensation	Stabilität / Robustheit
Zustandsregler mit PI-Ausgangsregelschleife	linear	gering	gering	gering	bedingt	sinnvoll	Reibungskomp. wirkt nachteilig
Internal Model Control	linear	gering	hoch	hoch	bedingt	nicht erforderlich	robust
Robustes Backstepping	nicht linear	hoch	sehr hoch	sehr hoch	gut	nicht erforderlich	robust

Tabelle 1: Vergleich der untersuchten Reglertypen

Eine weitere grobe Beurteilung nach verschiedenen Gesichtspunkten der in dieser Arbeit untersuchten Reglertypen zeigt Tabelle 1. Dabei wurde eine Bewertung nach Kriterien wie Linearität des Reglertyps, notwendiger Aufwand der Implementierung, Bewertung

der Stellgröße nach **Frequenz und Amplitude**, die Eignung zum Tracking, die Notwendigkeit einer **Kompensation der Reibung** sowie Stabilität und Robustheit getroffen. Speziell die beiden letzt genannten **Ansätze Internal Model Control und Backstepping** zeigen die vorhandenen Möglichkeiten einer **wesentlichen Verbesserung in Richtung Robustheit**.

Im Falle des Reglers **nach Internal Model Control** zeigte sich selbst bei einer massiven Parameterabweichung von 6 bzw. 7 Ringen Last ein brauchbares Regelverhalten, so das dieser Ansatz als zu **bevorzugendes Reglerentwurfskonzept** hervorgeht.

Dennoch zeigte sich **im Verlauf der Arbeit** auch die Notwendigkeit einer hohen Fertigungsqualität der **mechanischen Strecke** (z.B.: Getriebeispiel, Reibung) durch die erst eine qualitativ hochstehende **Regelung ermöglicht** werden kann. Als Schwerpunkt weiterer Forschung sei die **robuste Regelung von flexiblen Gelenken** in mehrachsigen Robotersystemen erwähnt.

Literatur

- [Hår05] O. Hårkegard. *Backstepping - From simple designs to take off*. Linköpings Universität, Automatic Control and Communication Systems, 2005.
http://www.control.isy.liu.se/~ola/Presentations/internsem_050127.pdf.
- [MZ89] M. Morari and E. Zafiriou. *Robust Process Control*. Prentice Hall Inc., New Jersey 07632mbH, 1989.
- [SB01] G. Schrabergger and G. Brandenburg. *Vergleich verschiedener Ansätze zur Simulation von Reibungseffekten und deren Verifikation an einem Vorschubantrieb*. Automatisierungstechnische Praxis 43, Heft 9, S.35-43, 2001.
- [Sch96] G. Schmidt. *Regelungs- und Steuerungstechnik 2*. Skriptum Technische Universität München, 1996.
- [Vie04] A. Viehweider. *Robust Backstepping - Algorithmic improvements for control of nonlinear electromechanical systems*. Dissertation, TU Wien, Juli 2004.
- [Wei95] A. Weinmann. *Regelungen - Analyse und technischer Entwurf, Band 1+2*. Springer-Verlag, 1995.

IEEE Conference on Decision and Control CDC 2003

9. – 12. December 2003
Hyatt Regency, Maui, Hawaii

At Hyatt Regency, Maui, Hawaii, the 42nd IEEE Conference on Decision and Control took place from December 9 – 12, 2003. A huge number papers, i.e., 1129 papers, were presented in 14 parallel sessions.

An outstanding Bode Lecture “Challenges of Nonlinear Identification” was rendered by Lennart LJUNG.

Plenaries were given by Katsuisa FURUTA: “Control of Pendulum: From super Mechano-System to Human Adaptive Mechatronics”; Vladimir KUCERA: “Feedback Control: The Origins, the Milestones, and the Trends”; Tamer BASAR: “Entanglement of Communication and Control”.

The topics in the parallel sessions changed in half-day rhythm. To illustrate the variety of topics and fields, a selected quantity is given in what follows. Some of them are well established and still vivid, some are brand new.

Complex systems focus on deterministic and stochastic, robust, nonlinear control and strengthen many classic design methods.

A main enterprise is the convergence of the three big “C”: Communication (wireless), Control and Computation.

Randomized algorithms are developed for robust control, robust estimation and robust adaptive control.

Several methods rely on differential geometry and symbolic approaches such as advances in high-order sliding modes.

An important subject is the implementation and development of control software for optimal control, H infinity control and fuzzy systems.

Several topics emphasize the need for combined time-driven and event-driven processes, so called hybrid systems, in simulation and design, for optimal timing control of hybrid systems and for Petri nets.

Networked control systems and packet losses is an emerging field of decision and control, very interesting topics refer to control of and support by wireless networks, stabilization, pricing and optimization of communication networks.

Multiple agent systems lead to emerging embedded software systems and to language-based description of multi-modal control tasks.

Uncertain systems are often **considered** subject to power constraints. Nonlinear output regulation and stabilization are **mainly** characterized by the trends in advanced uncertain nonlinear control.

There are a lot of attempts to manage chaotic systems, constraint control, and event-driven and switched systems.

Electromechanical control systems, **automotive** and aerospace systems are considered not only as automotive and vehicle control but as a cooperative control networked uninhabited autonomous vehicles, motor control **systems**, nonholonomic systems and robotics.

Control of biological systems and in **nanotechnology** shows exciting control needs as well as in behavioural system theory and **supervisory** control systems for critical structures.

Fault detection and accommodation **and** fault-tolerant systems is still an important field of research.

System theoretic methods in quantum control are representative for extremely new investigations, leading to the control of biological and biometrical systems.

Graph-theoretic methods are arising in the field of cooperative control, computational and numerical issues in systems and control, manufacturing and finance.

As a whole, the conference was very successful in terms of quality and diversity, encompassing both theoretical and **applied** approaches, in terms of advances in research and development as well as in emerging **technologies** and perspectives.

A. Weinmann

7. IFAC Symposium Cost Orientated Automation (COA 2004)

7. – 9. Juni 2004
Ottawa/Gatineau, Kanada

Das Symposium wurde am Campus der Universität von Quebec abgehalten und war bestens organisiert. Die Teilnehmer kamen aus 19 Ländern überwiegend aus Frankreich und Kanada . Das Programm bestand aus 4 Übersichtsvorträgen – einer davon aus Österreich -, 9 regulären Sessions und 2 Industrie-Workshops.

Der Übersichtsvortrag über „ Kostengünstige Produktrealisierung“ behandelte die Vorteile einer integrierten Produkt- und Prozessentwicklung. Er wurde begleitet durch das Industrie-Workshop „ Ingenieurstrategien zur Kostenreduzierung“.

Der 2. Übersichtsvortrag beschäftigte sich mit der Zusammenarbeit von Menschen, Maschinen und Robotern. Er ging ausführlich auf E-Technologien, E-Produktion und E-Instandhaltung ein welche neue Automatisierungsstrategien erfordern. Darüber hinaus ist die Entwicklung von „Kostengünstige Realisierung von Sensoren und Aktoren“ erforderlich.

In seinem Übersichtsvortrag „ Neue Technologien für kostengünstige Produktion mit spezieller Beachtung der KMU's,, gab der Autor eine Übersicht über realisierte kostengünstige Automatisierungsprojekte überwiegend aus der Fertigungsautomatisierung in Österreich und Mitteleuropa.

Der 4. Übersichtsvortrag über „ Ubitiquos Computing als neue Grenzen für Automatisierungslösungen“ präsentierte Zukunftsvisionen der Automatisierungstechnik. Der Übergang von virtuellen Lösungen zu industriellen Lösungen erfordert Bondgraphen und Hyperbondgraphen zur Realisierung.

Die technischen Vorträge, welche in neun Gruppen angeordnet waren, beschäftigten sich mit smart devices, Zusammenarbeit des Menschen mit Automatisierungssystemen, Gebäudeautomatisierung, Kosteneinsparung durch E-Wartung sowie die Verfügbarkeit von Netzwerken.

Es zeigte sich, dass sich dieses Symposium immer mehr als Brücke zwischen modernen Automatisierungsmethoden und industriellen Anwendungen etabliert. Von der ursprünglichen Idee nur kostengünstiger Automatisierungslösungen zu diskutieren hat es sich zwischenzeitlich zu einer Veranstaltung entwickelt welche die Kostenreduktion durch Automatisierungslösungen in der Produktion beispielsweise Instandhaltung, Energieerzeugung und Verteilung in den Vordergrund stellt.

Der 3. Tag war zwei Industrie-Workshops gewidmet welche auf Grund des Austragungsortes sich mit der Kostenreduzierung in der Automobilindustrie sowie der Bergbauautomatisierung auseinandersetzen.

Dieses IFAC Symposium hat sich in den letzten 20 Jahren seinen Platz in der international wissenschaftlichen Veranstaltungsszene gesichert. Das 8. Symposium gleichen Titels ist für 2007 in Havanna, Kuba geplant.

American Control Conference 2004 (ACC 04)

30.6. – 2.7. 2004
Boston MA, USA

Die American Control Conference 2004 (ACC 04), gesponsert und organisiert vom American Automatic Control Council (AACC) in Kooperation mit IFAC fand von 30. Juni bis 2. Juli im Boston Sheraton Hotel statt. Die Konferenzbeiträge umspannten regelungstechnische Aspekte der 8 Mitgliedsorganisationen AIAA, AIChE, AISE, ASCE, ASME, IEEE, ISA und SCS des AACC.

Das technische Programm der Konferenz war in 19 parallele Tracks mit jeweils einer Sitzung am Vormittag und 2 Sitzungen am Nachmittag organisiert. Es handelte sich also um eine Monsterveranstaltung mit dem für die ACC neuen Rekord von 1031 Präsentationen – und dies, obwohl nur ca. 60% der eingereichten Beiträge akzeptiert worden waren. Jedenfalls reflektierte dieses sehr umfangreiche Programm das ungeschmälerte Interesse am Gebiet der Regelungstechnik und seiner Anwendung in immer neuen Anwendungsgebieten und an neuen theoretischen Entwicklungen. An jedem Konferenztag fand vor Beginn der Vormittags-Session ein Plenarvortrag statt. Die Plenarvortragsredner waren Yu-Chi Ho (Harvard University und Tsinghua University Beijing) zum Thema *Optimierung und verteilte Intelligenz*, Kevin A. Wise (Boeing) über *Unbemannte Flugzeuge. Die Zukunft der militärischen Luftfahrt* und Claire J. Tomlin (Stanford University) zum Thema *Hybride Systeme*.

Die ACC 04 bot neben den technischen Sitzungen auch noch eine Anzahl spezieller Sessions, wie z.B. 4 interaktive Sitzungen, in denen die Vortragenden um einen stimulierenden interaktiven Austausch mit der Zuhörerschaft bemüht waren. In 10 sogenannten Tutorial Sessions wurden relativ neue regelungstechnische Methoden und Techniken vorgestellt. Danach folgte eine Diskussion der Implementierung, Anwendung und der mit diesen Methoden im industriellen Einsatz erzielbaren Verbesserungen.

Wie jedes Jahr, umfasste das technische Programm neben einer Vielzahl klassischer, systemtheoretischer Tracks, wie z.B. *Robust Control, Optimal Control, Estimation, Adaptive Control, Sliding Mode Control* etc., auch Tracks zu sich neu entwickelten Themen. Als repräsentative Beispiele seien hier die Tracks *Modeling and Control of Automated and Manually Driven Highways, Control of Flexible Structures* sowie *Systems Engineering of Systems Biology* genannt. Für den Bericht von besonderem Interesse war ferner der Track *Control Education*, in dem innovative Methoden der Wissensvermittlung behandelt wurden.

Eine Qualitative Gesamtbeurteilung der Konferenz durch einen Einzelbeobachter ist auf Grund der Vielzahl der Sitzungen und Themen sehr schwierig. Aus Erfahrungen bei ACCs in der Vergangenheit kann jedoch gesagt werden, dass das Niveau in den vom Bericht besuchten Sitzungen sowohl vom Inhalt als auch der Art der Präsentation her sehr hoch war und, dass alle Beiträge auch tatsächlich präsentiert wurden. Zusammenfassend kann man daher ohne jede Einschränkung sagen, dass die American Control Conference 2004 eine professionell organisierte Konferenz mit sehr hohem wissenschaftlichen Niveau war.

5. IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV'04)

5. – 7. Juli 2004
Lissabon, Portugal

Das 5. IFAC Symposium über „Intelligent Autonomous Vehicles“ fand parallel zum Robo Cup 2004 und zur Fußballeuropameisterschaft in Lissabon statt. Den ungefähr 200 Teilnehmern, naturgemäß die meisten aus Portugal und Spanien, wurden 4 Übersichts- und 165 Fachvorträge aus mehr als 30 Ländern geboten. Diese Beiträge waren in 6 Plenarsitzungen und 32 technischen Sitzungen angeordnet.

Die Übersichtsvorträge waren auf hohem technisch-wissenschaftlichen Niveau. J. Albus, (USA) hielt ein Paper über „Real-Time Control“ mit Anwendungsbeispielen von militärischen unbemannten autonomen Fahrzeugen. S. Hayati, Manager für Mars Missionen in der NASA, berichtete über Missionen die eher der Wissenschaft dienen. Schwierigkeiten dabei sind der richtige Eintrittswinkel in die Atmosphäre mit einem Fehler von weniger als 0,05 Grad und die Abbremsung des Flugkörpers vor der Landung. Er stellt in Aussicht dass 2009 ein Marsfahrzeug mit einem nuklearen Antrieb als Labor für die Analyse von Proben des Marsbodens auf den Mars geschickt wird. S. Hirose vom Tokio Institut of Technologie hielt ein Survey-Paper über Rettungsroboter. Es handelt sich dabei um Roboter die die Bewegung von Schlangen imitieren wobei bemerkenswert ist, dass Bewegungen möglich sind zu der keine Schlange fähig ist. Darüber hinaus stellte er Roboter vor die sowohl gehen als auch fahren können. Eine mögliche Anwendung ist in der Entfernung von Landminen zu suchen. G. Verrugio stellte aktuelle Forschungsarbeiten über Unterwasserroboter vor und diskutierte weiters über ethische soziologische und humanitäre Aspekte der Robotertechnik.

Die technischen Papers beschäftigten sich mit Navigation, Positionserkennung, Mehrrobotersysteme, Sensorik, Steuerung, zweibeinige humanoide Roboter und deren Anwendungen in Outdoor Umgebungen wie Gelände, Luft, im Weltraum und unter Wasser. Eine spezielle Session war dem von DARPA - hier fehlt die Erklärung der Abkürzung – eingeführten Wettbewerb DARPA Grand Challenge. Die Aufgabe bestand darin, dass autonome mobile Fahrzeuge 200 Kilometer quer durch die Wüste fahren sollten. Dieses Jahr schaffte es keines der angetretenen Teams und das Preisgeld von 2 Millionen US Dollar blieb im Tresor.

Österreich war mit einem Paper der Technischen Universität Wien über mobile Miniroboter mit Beschleunigungssensoren vertreten.

Der erste Tag von IAV fand gemeinsam mit dem Robo Cup Symposium statt. Auf letzterem wurde über die zukünftige Entwicklung im Robo Cup diskutiert. Als erstes Ergebnis kristallisierte sich heraus, dass die Robo Cup Community die gewonnenen technologischen Ergebnisse mehr in praktische Anwendungen umsetzen sollte. Als potentielle Anwendungsfelder kristallisierten sich die Ergebnisse aus der Rescue-League und Junior-League heraus.

Die Veranstalter organisierten trotz „Behinderung“ durch die Roboterfußballweltmeisterschaft die Tagung optimal. In Übereinstimmung mit dem 3 Jahres Rhythmus der IFAC wird die nächster Tagung IAV 07 voraussichtlich 2007 in Toulouse stattfinden.

IFAC Multitrack Konferenz über „Advanced Control Strategies for Social and Economic Systems“ – ACS`04.

2. – 4. September 2004
Vienna, Austria

Die Grundidee dieser IFAC Multitrack Konferenz war 5 technische Komitees der IFAC in einer Tagung zu vereinigen. Auf Grund der involvierten IFAC Technical Committees über Supplemental Ways of Improving International Stability (SWIIS), Cost Oriented Automation (COA), Economic and Business Systems (???), Social Impact of Automation (???) und Developing Countries (DECOM) war das Spektrum der Beiträge sehr breit gestreut. Darüber hinaus wurde diese Konferenz von 6 anderen IFAC Technical Committees co-gesponsert.

Das Programm beinhaltete 5 Übersichtsvorträge sowie 32 technische Vorträge, welche in 10 Sessions angeordnet waren. Überdies wurde eine Podiumsdiskussion abgehalten. Die 5 Übersichtsvorträge beschäftigten sich natürlich schwerpunktmäßig mit den Arbeitsinhalten der 5 Haupt-sponsoring Komitees. Die Survey Papers beschäftigten sich mit folgenden Themen:

- Ethik in Forschung und Praxis unter besonderer Berücksichtigung von Umwelt und sozialen Aspekten,
- wissenschaftlicher Fortschritt und seine technischen Anwendungen unter seiner besonderen Berücksichtigung von sozialen und ethischen Gesichtspunkten,
- Management von „Multi agent Networks“,
- Konfliktlösungen in globalen Unternehmungen sowie Mensch-Maschine und Mensch-Mensch Kooperation in modernen Unternehmungen.

Dementsprechend waren auch die 32 technischen Papers in Sessions mit Titeln wie soziale Aspekte, Ethik in den Ingenieurwissenschaften, ökonomische Aspekte der Automatisierungstechnik, moderne Produktion und Robotertechnik und regelungstechnische Aspekte zusammengefasst.

Die Tagung wurde von 46 Teilnehmern aus 19 verschiedenen Ländern besucht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Ethik immer mehr in der Automatisierungstechnik an Bedeutung gewinnt, dass Konfliktlösungsstrategien mit den klassischen Methoden der Automatisierungstechnik immer mehr Eingang finden, dass sich die sozialen und gesellschaftspolitischen Aspekte der Automatisierungstechnik immer mehr in Richtung Mensch-Mensch und Mensch-Maschine Kooperation verschieben, und dass moderne Produktionstechnologien in der Automatisierungstechnik neue Probleme, welche im vorhergehenden angesprochen wurden, aufwerfen.

Im Rahmen dieser Tagung fand auch eine Sitzung des IFAC Technical Committees SWIIS statt.

Das soziale Programm umfasste eine Welcome-Party an der Technischen Universität Wien sowie ein Bankett bei einem typischen Wiener Heurigen

Der Tagungsband wird vom Elsevier als Allein-publisher von IFAC veröffentlicht werden.

3. IARP-Clawar - EURON Workshop über „Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments”

7. – 9. September 2004
University of Salford, England

Der Begriff “Dependability” ist derzeit noch nicht klar definiert. Er bezieht sich auf eine neue Generation von intelligenten Robotern, welche in der Lage sind mit Menschen in kooperativer Art und Weise zusammenarbeiten. In Zukunft sollen beispielsweise Mensch und Roboter an einem Arbeitsplatz gemeinsam arbeiten, wobei der Mensch seine Intelligenz und Fingerfertigkeit, der Roboter seine Schnelligkeit einsetzt. Weitere Anwendungsgebiete kristallisieren sich in der Rehabilitation und als Freund und Helfer für ältere Menschen heraus.

Den ungefähr 60 Teilnehmern wurde in Form von 32 Vorträgen und einer Panel-discussion ein Überblick über den derzeitigen Stand des Wissens über diese neue Robotergeneration und ihre Anwendungen gegeben. In einer so genannten „Break out session“ wurde von 3 unabhängigen Arbeitsgruppen versucht die Hauptergebnisse übersichtlich zusammenzustellen.

Wie bei einem neuem Fachgebiet üblich, waren die behandelten Themen sehr breit gestreut. Einige der Vorträge behandelten neue Technologien zur Realisierung der menschlichen Hand, der Arme, des Torsos sowie der Beine. Breiten Raum nahmen auch neuartige Sensoren, welche den Robotern Intelligenz verleihen sollen, ein. Hervorzuheben ist ein Beitrag aus England, wo versucht wird Sensoren zu entwickeln welche von Tieren, wie beispielsweise dem Lachs, Vögeln, Tauben, Ameisen, kopiert werden. Es wurden konkrete Experimente mit Geruchssensoren vorgestellt. Die dazu eingesetzten chemischen Substanzen benötigen allerdings bei einer Geruchsprobe von 3 Sekunden 12 Sekunden zur Regenerierung.

Ein Hauptproblem bei der Anwendung dieser neuen Roboter stellen Sicherheitsaspekte dar. Die derzeitigen Roboterarme können bei unkontrollierten Kollisionen zu Verletzungen führen. Deshalb behandelten einige der Vorträge die Entwicklung von „sicheren“ Roboterarmen, was beispielsweise durch eine passive Regelung erreicht wird.

Als erste Anwendungen kristallisieren sich die Rehabilitation – der Roboter als Therapeut, und die Betreuung älterer Menschen - heraus. So wurde in einem Vortrag festgestellt , dass im Jahre 2020 in Japan ein Drittel der Bevölkerung über 65 Jahre sein wird. Diese Roboter sollen ältere Menschen nicht nur bei Arbeiten im Haushalt sondern auch als treuer Freund begleiten. Ein großes Problem stellt dabei allerdings die Akzeptanz älterer Menschen für diese Roboter dar, was durch geeignetes Aussehen sowie geeigneter Benutzeroberfläche zukünftig behoben werden sollte. Weitere Probleme außer Sicherheit und Benutzerakzeptanz sind die Verfügbarkeit, die Wartungsfreundlichkeit sowie die Robustheit. Ein weiteres Anwendungsgebiet wurde in einem österreichischem Paper, welches sich mit Robotern zur Unterhaltung beschäftigte, diskutiert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass dringend neue Sicherheitsvorschriften sowie eine Standardisierung auf der Roboterseite erforderlich sind. Üblicherweise wissen die Entwickler dieser Roboter nicht was die Benutzer von den Robotern erwarten. Dies hängt unter anderem von den speziellen Anwendungsgebieten ab. Steht bei einem Roboterspielzeug (toy robot) die Sicherheit im Vordergrund, ist es auf der Produktionsebene neben der

Sicherheit sicher die Verfügbarkeit und die Wartbarkeit. Weiters zeigte sich, dass Autonomie die Kooperationsfähigkeit erhöht, was allerdings wieder zu den bereits erwähnten Sicherheitsproblemen führt. Es bleibt abzuwarten wieweit sich diese neue Robotergeneration in konkreten Anwendungen etabliert und wie die anstehenden Probleme in den nächsten drei bis fünf Jahren gelöst werden.

Bemerkenswert ist, dass alle Präsentationen bestens vorbereitet und vorgetragen wurden. Die Veranstaltung wurde vom Institut für Robotertechnik und Automatisierung der University of Salford bestens organisiert und abgewickelt.

P. Kopacek

19. Österr. Automatisierungstag im Rahmen der SMART-Automation Austria

7. Oktober 2004,
Design Center Linz

Dieser Automatisierungstag stand unter dem Thema „Nanoautomation“. Die Nanotechnologie eröffnet der Automatisierungstechnik neue Perspektiven. Und beschäftigt sich mit Dimensionen in der Größenordnung des Atomaufbaues. Beherrscht man diese Dimensionen – man ist derzeit am besten Wege dazu – ergeben sich für die Automatisierungstechnik neue, derzeit noch nicht abschätzbare Möglichkeiten. Nanomaterialien können mit bestimmten vordefinierten Eigenschaften hergestellt werden und beispielsweise dazu dienen preiswerte integrierte Miniaturautomatisierungseinrichtungen ohne Hilfsenergie zu entwickeln.

Zunächst gab der derzeitige Präsident der International Federation on Automatic Control Prof. V. Kucera von der TU Prag seine schon zur Tradition gewordene Presidential-Lecture. Sie stand diesmal unter dem Titel „Ursprünge, Meilensteine und Trends in der klassischen Regelungstechnik“. Am Anfang des Vortrages standen die ersten Ansätze der Regelungstechnik und insbesondere der Rückkopplung. Die klassische Rückkopplung ist derzeit auch in der modernen Regelungstechnik unabdingbar und wird sich dramatisch weiter entwickeln. Verantwortlich dafür sind neue Methoden welche mit den Mitteln der Informationstechnik ökonomisch realisierbar erscheinen.

In seinem Vortrag Nanoautomatisierung brachte Prof. G. Schlacher von der Universität Linz erste Ideen zur Anwendung der Nanotechnologie im Gesamtgebiet der Automatisierungstechnik. Er beschrieb Beispiele von zukünftig realisierbaren Sensoren welche auf Nanotechnologie basieren und zukünftig neue Anwendungsfelder eröffnen. Durch neue Nanomaterialien können beispielsweise Nanolager welche eine Mischung zwischen Gleit- und Wälzlager sind entwickelt werden. Er betonte aber mehrmals, dass an der Verwirklichung gearbeitet wird, aber derzeit noch keine industriell einsetzbaren Lösungen existieren. Dr. M. Hofbauer von der TU Graz ging in seinem Vortrag auf Autonome Automatisierung „Autelligence“ ein.

Anschließend gab Prof. Dr. H.P. Osanna von der TU Wien einen Überblick über die Nanomesstechnik. Die Messtechnik hat sich derzeit so weit entwickelt, dass – derzeit noch

mit hohem Aufwand – beispielsweise mit Hilfe von Atomkraftmikroskopen Dimensionen im Nano- und sogar im Piko-Bereich messtechnisch erfassbar sind. Er zeigte an Hand von ausgewählten Beispielen die Entwicklungsmöglichkeiten dieser neuen Dimension der Messtechnik.

Im letzten Vortrag Nanoroboter – Naniten- beschäftigte sich Prof. Dr. P. Kopacek von der TU Wien mit diesem aktuellen Gebiet der Robotertechnik Ein Nanoroboter ist ein spezielles Gerät im Nanobereich das zur Ausführung einer speziellen Aufgabe mit extrem hoher Genauigkeit entwickelt wurde. Die Abmessungen dieser Roboter liegen im Nanometer Bereich (10^{-9} Meter). Derzeit sind 2 Gruppen in Entwicklung: Autonome Naniten welche einen Onboard-Nanocomputer zur Steuerung haben. Diese arbeiten vollkommen autonom. Insektenroboter kopieren z.B. Ameisen, Bienen, werden aber von einem Zentralrechner gesteuert. Zukünftig sollen sie so genannte Roboterschwärme realisieren. Derzeit abschätzbare Anwendungen sind in der Medizin, der Mikromontage und im Nanohandling beispielsweise für Atomkraftmikroskope bei der IC-Herstellung und der Herstellung von Mikro- und Nanoantrieben. Zusammenfassend stellte der Vortragende fest, dass man von Robotern mit Abmessungen im Nanobereich noch weit entfernt ist, dass aber Nanobauteile es gestatten, die Roboter derzeit bis in den Zentimeterbereich zu verkleinern.

Im Rahmen dieses Automatisierungstages fand auch wieder die Verleihung der Fred Margulies Preise durch Bundesministerin a.D. E. Hostasch statt. Die Laudatio hielt Senator h.c. Dr. N. Rozsenich. Die Preise fielen diesmal an Dr. M. Kupnik von der Montanuniversität Leoben für seine Arbeit „Ultraschall Gasdurchflussmessgerät nach dem Laufzeitprinzip für automobiler Anwendungen“, sowie an Dr. B. Putz von der TU Wien für seine Arbeit „Ein Beitrag zur Navigation mobiler intelligenter Miniroboter“.

Die beiden Hauptveranstalter der IFAC-Beirat Österreichs sowie die Österr. Gesellschaft für Robotertechnik konnten diesmal mit dem Besuch zwischen 30 und 80 Teilnehmern zufrieden sein.

P. Kopacek

2. Österreichisches - Koreanisches Gemeinschaftsseminar über Intelligente Roboter

28. Oktober 2004

Bexco Convention Hall, Pusan (Korea)

Nachdem ersten Gemeinschaftsseminar zum gleichen Thema anlässlich der Roboterfußballweltmeisterschaft 2003 in Wien, fand das 2. Seminar dieser Art nun in Korea statt. Es wurde vom Fond zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) und dem Koreanischen Wissenschaftsfond (KOSEF) unterstützt.

Zweck dieser Veranstaltung ist ein Erfahrungsaustausch zwischen Wissenschaftlern beider Länder über das Gebiet der mobilen intelligenten Roboter. Während von koreanischer Seite überwiegend über humanoide Roboter – ein Forschungsschwerpunkt der koreanischen Regierung bis zum Jahr 2014 – berichtet wurde, behandelten die österreichischen Beiträge im

wesentlichen den Stand der Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet in Österreich sowie neuere Entwicklungstendenzen überwiegend auf dem Gebiet mobiler intelligenter Miniroboter.

Von österreichischer Seite berichtete zuerst P. Kopacek über den derzeitigen Stand der Robotertechnik in Österreich. Derzeit sind ungefähr 3700 unintelligente meist stationäre Industrieroboter sowie ungefähr 150 mobile intelligente Roboter im Einsatz. Die Forschung auf diesem Gebiet konzentriert sich im wesentlichen auf Universitätsinstitute, einige wenige Forschungseinrichtungen sowie Industrieunternehmen.

Mit dem neuen zukunftssträchtigen Fachgebiet setzte sich der 2. Vortrag von M.W. Han mit dem Titel „Roboterfußball und Edutainment“ auseinander. Letzteres ist ein künstlicher Fachbegriff, zusammengesetzt aus den Worten Education by Entertainment. Diesem wird in nächster Zeit eine sehr hohe Steigerungsrate vorhergesagt, wobei hier bereits einige österr. Unternehmen am Markt tätig sind.

Bernhard Putz gab einen Überblick über die Entwicklung einer neuen Generation von mobilen Minirobotern welche sich durch sehr hohe Präzision der Fertigung und dadurch Bahnverfolgungsgenauigkeit, kompakte Bauweise und extreme Miniaturisierung auszeichnen. Der 4. österr. Beitrag von Markus Würzl und Edmund Schierer beschäftigte sich mit fortgeschrittenen Bahnplanungsalgorithmen für sich schnell bewegende Roboter.

Alle österr. Beiträge kamen von der Abteilung Intelligente Handhabungsgeräte und Robotersysteme der Technischen Universität.

Wie bereits ausgeführt, beschäftigten sich die koreanischen Beiträge mit den Schwerpunktsetzungen des Technologieprogramms der koreanischen Regierung.

Mit dem „Mysterium“ der Markteinführung von Servicerobotern beschäftigte sich ein Beitrag der Firma Samsung, welcher auf fundierten Marktstudien im asiatischen Raum basierte. Demnach werden intelligente mobile Serviceroboter in der nächsten Zeit nur in einigen ausgewählten Bereichen, wie beispielsweise: Haushalt, Krankenpflege, Vergnügungs- und Unterhaltungsindustrie ein größeres Marktvolumen erreichen.

Zwei koreanische Paper beschäftigten sich mit dem Benutzerinterface – Mensch-Maschine Schnittstelle – von dieser neuen Robotergeneration. Es wird hier auf Methoden der Bildverarbeitung und der komplexen Sensorik zurückgegriffen.

Ein sehr interessanter koreanischer Beitrag beschäftigte sich mit der Entwicklung eines Hightech-Bettes, bei dem sich punktförmig die Steifigkeit dem Gewicht und Abmessungen des Patienten anpasst.

Schließlich gaben 2 Beiträge einen Überblick über Entwicklung von humanoiden, zweibeinigen Robotern in Korea. Derzeit werden in Korea ca. 30 dieser Roboter, meistens an Universitätsinstituten und anderen Forschungseinrichtungen, entwickelt. Eine breitere Markteinführung ist aber derzeit noch nicht abzusehen.

Das Seminar fand im Rahmen des FIRA Weltkongresses sowie der FIRA Roboterfußball-Weltmeisterschaft statt und wurde gemeinsam vom Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) und vom IHRT der Technischen Universität Wien organisiert. Die Vorträge wurden für die ca. 70 Teilnehmer in einem Tagungsband zusammengefasst.

Es soll darüber hinaus versucht werden im Jahr 2005 oder 2006 das 3. Österreichische-Koreanische Gemeinschaftsseminar über intelligente mobile Roboter mit verstärkter Firmenbeteiligung zu organisieren.

IEEE Conference on Decision and Control CDC 2004

14. – 17. December, 2004
Atlantis, Paradise Island, The Bahamas

At the Atlantis, Paradise Island, The Bahamas, the 43rd IEEE Conference on Decision and Control took place from December 14 – 17, 2004.

936 papers were presented in 13 parallel sessions.

Three outstanding plenary sessions were given.

T. BUCHMAN presented “Control Theories in Critical Illness and Critical Care”, illuminating three leading theories of physiologic control: homeostasis, network theory and allostasis.

J. W. GRIZZLE rendered “Walking and Running in Bipedal Robots: Control Theory and Experiments”. The advance biped robot requires both a lot of systematic theoretical efforts and the application of heuristic principles. Biped logged walking and running robots are the representatives in new robot opportunities, following the design of a stable orbit in a high degree-of-freedom hybrid model. Based on an idea of virtual constraints, the asymptotic behaviour is of less degree of freedom. Videos of very interesting experiments were shown.

The Bode lecture “Games, Decisions and Control: Fifty years back, fifty years forward” was given by T. BASAR. Strategic dynamic decision making in an adversarial environment requires both (optimum) control theory and differential games. The lecture emphasized how control and differential games influenced each other in recent decades. Very challenging is interaction and cooperation between games, decisions, and control. Differential games enriches control and worst-case design. T. Basar concluded with statements which allow for parallel developments and competing approaches, for diversity and curiosity to reach new frontiers in research.

In what follows, a selection of important issues is presented. An entire overview of all the classical topics would exceed a short report.

What are the abstractions to combine the big “C”, communication, computing, control?

How to proceed from data-poor to data-rich control? Data-poor installations are characterized by expensive sensors and the need of models with high accuracy. Data-rich control uses a lot of cheap sensors. But which models are required? How do we survive in a noisy environment?

When considering a system as a collection of asynchronously interconnected components, sampling such a time-driven system is simple but inherently inefficient. Better would be to wait for an event to trigger the sensing activity.

What are the activities and the essential demands to restart a failed implementation?

Middleware as the software between operating system and application: What are the appropriate middleware services requiring minimum reconfiguration and reprogramming? How to enable rapid design and deployment?

For a long time, control efforts focused on the physical complexity of processes. In manufacturing we have to cope with operational complexity and we require new models.

Is there a coherent core to our research community, handling the wide spectrum and diversity of application challenges and mathematical theories? Given this diversity, how should we teach and which efforts should be made to reach our colleagues in other disciplines.

Control theory will be a central domain in the emerging fields nanoconstruction, biological processes and cellular regulation.

A. Weinmann

MATLAB 7

Eine Einführung

Ch. Überhuber, St. Katzenbeisser und D. Praetorius

Springer-Verlag Wien New York , 2005
309 Seiten, 57 Abbildungen
ISBN 3-211-21137-3

Bei MATLAB handelt es sich um ein multifunktionales Programmsystem, welches numerisch orientiert ist. Mit diesem interaktiven Programm können Gleichungen sehr einfach definiert und ausgewertet werden, sowie Daten und selbst definierte Funktionen gespeichert und Berechnungsergebnisse graphisch dargestellt werden. Es umfasst neben Methoden der Matrizenrechnung noch viele andere numerische Verfahren z.B. zur Nullstellenbestimmung von Polynomen, für die FFT (Fast-Fourier-Transformation) und für die numerische Lösung von gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen. Umfangreiche Graphikfunktionalität ermöglicht das Erstellen von zwei- und dreidimensionalen technischen Graphiken am Farbbildschirm oder Drucker. Das Software Paket verfügt über einen Interpreter sowie über eine Reihe von Zusatzmodulen (Toolboxen).

Die vorliegende 7.Auflage dieses Klassikers besticht durch systematischen Aufbau, sowie durch Klarheit der Darstellung. Es kann daher als erste Einführung in MATLAB wärmstens empfohlen werden.

P. Kopacek

Informatik

Aufgaben und Lösungen

W.Kastner, G.-H. Schildt

Springer Verlag, 3. Auflage
124 Seiten
ISBN 3-211-21136-5

Diese Büchlein ist begleitend zu dem Buch Informatik (Blieberger et al) zu sehen. Der Unterschied dieser 3.Auflage zur vorhergehenden besteht darin, dass nicht nur Aufgaben und Lösungen sondern vor jedem Abschnitt das Wesentliche des jeweiligen Themengebietes kurz gefasst präsentiert wird. Es kann daher sowohl den Studierenden als auch den in der Praxisstehenden, welche sich mit Informationstechnik beschäftigen, als Einführung wärmsten empfohlen werden

P. Kopacek

Automatisierung komplexer Industrieprozesse Systeme, Verfahren und Informationsmanagement

B. Favre-Bulle

Springer Verlag Wien New York, 2004
432 Seiten, 239 Abbildungen
ISBN 3-211-21194-2

Das Buch verfolgt das Ziel in die Fachgebiete Prozess- und Fertigungsautomatisierung einzuführen. Der Ansatz der Darstellung ist ein ganzheitlicher : Ausgehend vom Systemgedanken werden die einzelnen technischen Komponenten und Verfahren erläutert, und im Hinblick auf ihre gegenseitige Interaktion analysiert. Besondere Beachtung finden Informationsprozesse und Informationssysteme, die in der industriellen Automation eine zentrale Rolle spielen. Die informationstechnisch / physikalische Analyse von komplexen Prozessen bildet die Grundlage zur Synthese von Automatisierungssystemen. Es werden etablierte und neue industrielle Informationstechnologien behandelt. Zu den ersteren gehören zum Beispiel die CA Technologien, zu den zweiteren Methoden und Konzepte aus dem aktuellen Fachgebiet der kognitiven Informationsverarbeitung. Der Autor war auf diesem Fachgebiet wissenschaftlich längere Zeit tätig. Kognitive Informationsverarbeitung verfolgt das Ziel menschliches Denken maschinell nachzubilden. Es werden daher konektionistische Systeme und die grundlegenden Verfahren der industriellen Bildverarbeitung eingehendst dargestellt und diskutiert. Verteilte Steuerungsarchitekturen sind derzeit ein intensives Forschungs- und Entwicklungsgebiet. Da diese zukünftig vermutlich eine große Rolle in Automatisierungssystemen spielen werden, wird das Thema an mehreren Stellen des Buches behandelt und von verschiedenen Seiten beleuchtet.

Das Ziel des Lehrbuches grundlegende Kenntnisse über Systemtechnik in der Automatisierung, Komponenten der Automatisierung, Prozessleittechnik, Prozesse und Verfahren in unternehmerischen Systemen sowie über Informationssysteme und moderne Verfahren der kognitiven Informationsverarbeitung zu vermitteln, kann als geglückt bezeichnet werden. Es kann sowohl als Lehrbuch als auch darüber hinaus als Nachschlagewerk für Ingenieure in der industriellen Praxis dienen.

P. Kopacek

Service Roboter Visionen

R.D. Schraft, M. Hägele, K. Wegener

Hanser Verlag
223 Seiten, zahlreiche Abbildungen
ISBN 3-446-22840-3

Von Golem über HAL bis hin zu R2D2 und seinen Freunden in „Krieg der Sterne“: Roboter sind eines der faszinierendsten Gebiete der Technik. Insbesondere menschenähnliche oder humanoide Roboter regen schon immer die Fantasie der Menschen an. Mit dem Einzug der Industrie-Roboter in die Fabrikhallen wurde der Blick auf die Robotertechnik sehr nüchtern. Unter einem „richtigen“ Roboter hatte man sich etwas anderes vorgestellt. Aber mittlerweile werden Service-Roboter entwickelt, die genau jene Fantasien wiedererwecken.

Die Autoren zeigen, welche Einsatzgebiete die Service-Robotik bereits erobert hat und wie die Zukunft aussehen könnte. Themen wie künstliches Leben, Humanoide in Form komplexer mechatronischer Systeme, Roboter auf Planeten- oder Meereserkundung erinnern den Leser an Science Fiction. Dahinter steht jedes Mal der reale Stand der weltweiten Forschung und Technik. Noch greifbarer wird die Thematik, sobald Service-Roboter in unserem unmittelbaren Umfeld auftreten zum Beispiel als Haushaltshilfe oder Pflegepersonal. Schließlich werden die neuen Roboter als Chirurgieassistent oder Mikroagent in der Medizin vorgestellt. Das Buch kann jedem „Roboterinteressierten“ wärmstens empfohlen werden.

P.Kopacek

Automatisierungstechnik mit der SIMATIC S5 und S7

Herausgegeben von einem Autorenkollektiv

Verlag Europa Lehrmittel, 2003, 4.Auflage
282 Seiten, mit Abbildungen
ISBN 3-8085-3154-1

Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) haben einen festen Platz in der Automatisierungstechnik. Zweck dieses Buches ist es Fachleuten und Berufsanfängern die auf diesem Gebiet tätig sind, Möglichkeiten dieser Technik näher zu bringen.

Das Buch führt in die Arbeitsweise speicherprogrammierbarer Steuerungen ein. Dabei wird die Lösung von Steuerungsproblemen durch Anwendung von Verknüpfungs- und Ablaufsteuerungen gezeigt. Es werden ausführlich Programme mit linearen und verzweigten Schrittketten sowie Programmstrukturen mit Sprüngen und Schleifen erörtert. Weitere Abschnitte beschäftigen sich mit Wortverarbeitung mit arithmetischen Funktionen, Verarbeitung von Analogwerten in der digitalen Regelungstechnik, Programmierung nach IEC 1131, Petrinetzen und AS-Interfaces.

Bei sehr umfangreichen SPS Programmen wendet man vorteilhaft die strukturierte Programmierung an. Das Steuerungsprogramm wird dabei aus einzelnen Bausteinen zusammengesetzt, die – nach Bedarf – in beliebiger Reihenfolge und beliebig oft aufgerufen werden. Dadurch wird eine Beschleunigung des gesamten Steuerungsablaufes erreicht. Sicherheitstechnische Grundlagen für die Anwendung von SPS in der Praxis sind Inhalt eines eigenen Kapitels.

Die in diesem Buch enthaltenen Programmbeispiele sind für die Steuerungen SIMATIC S5 und S7 erstellt. Mittels beiliegender CD können die Programmbeispiele des Buches komfortabel nachvollzogen sowie Steuerungen und Funktionen schnell getestet werden.

Das Buch ist nach dem Lernprinzip Bottom-up aufgebaut. Es führt über einfache Verknüpfungen zu typischen Anwendungen von SPS in der Automatisierungstechnik. Es ist daher gleichermaßen für das Selbst- sowie für das Weiterlernen geeignet. Diese Buch stellt eine ausgezeichnete Hilfe für den Einstieg in die Technik der speicherprogrammierbaren Steuerungen dar.

P. Kopacek

Grundlagen der Automatisierungstechnik

Regelungssysteme, Steuerungssysteme, Hybride Systeme

L.Litz

Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005
529 Seiten, zahlreiche Abbildungen
ISBN 3- 486-27383-3

Die Digitaltechnik ist seit Jahren eine der wichtigsten technischen Grundlagen in der Automatisierung. Dies bedeutet, dass die heutigen Problemlösungen der Automatisierungstechnik weitgehend auf Software basieren. Jede Automatisierungsfunktion hat ihr Pendant in Algorithmen, also Rechenvorschriften, die in geeigneter Software dargestellt und auf einer speziellen Rechnerumgebung ablaufen.

Dieses Grundlagenlehrbuch beschäftigt sich mit Wegen, wie man zu diesen für Softwarelösungen erforderlichen Algorithmen kommt. Es wird hier der übliche prozessunabhängige Weg gewählt. Diese Methoden sind dadurch von der Gebäudeautomation über die Automatisierung eines Hochgeschwindigkeitszuges oder einer Chemieanlage anwendbar. Er ist auch weitgehend unabhängig vom Zielsystem, das zum Beispiel ein Mikrokontroller, eine speicherprogrammierbare Steuerung oder ein PC sein kann, sowie von der verwendeten Programmiersprache. Es wird sowohl die Regelung und Steuerung kontinuierlicher als auch ereignisdiskreter, sowie deren Kombination hybride Systeme behandelt.

In einer Einleitung wird das Rückkopplungsprinzip sowohl für kontinuierliche als auch für zeitdiskrete Systeme erläutert. Kapitel 2 behandelt danach die kontinuierlichen Regelsysteme und beschäftigt sich mit den üblichen Problemstellungen einschleifiger Regelkreise, Regelungssysteme, Modellierung im Zeit- sowie im Frequenz und Z-Bereich dar. Dem Begriff der Stabilität ist ein eigenes Unterkapitel gewidmet. Neben den klassischen Standardstrukturen (PID und Modifikationen) werden auch komplexere (Kaskaden, Störgrößenaufschaltung) bis hin zum IMC – Regler (Internal Model Control) behandelt.

Kapitel 3 behandelt die Steuerungssysteme und basiert auf der Systembeschreibung mit ereignisdiskreter Dynamik. Recht ausführlich wird der Steuerungsentwurfsprozess erläutert und bildet den Rahmen für alle die im Weiteren beschriebenen Modellierungsformen und Methoden. Neben der Booleschen Algebra werden endliche Automaten, Petrinetze, und temporale Logik behandelt.

Kapitel 4 behandelt die Hybriden Systeme und basiert auf zwei grundsätzlichen Modellierungsformen nämlich der Hybridenautomaten und der Petrinetze.

In diesem Buch wird die Automatisierungstechnik nur soweit behandelt, dass man in der Lage ist, praktische Automatisierungsaufgaben zu lösen. Dazu sind in den einzelnen Kapiteln Beispiele angegeben, welche unmittelbar die Anwendung der dargestellten Theorien verdeutlichen.

Das Buch wendet sich gleichermaßen an Studierende der Ingenieurdisziplinen als auch der Informatik. Im Wesentlichen sind zum Verständnis keinerlei Grundkenntnisse aus der Mathematik erforderlich, da diese ausführlich dargestellt werden.

Bausteine mechatronischer Systeme

William Bolton

Verlag Pearson Studium München, 2004
3. Auflage, 752 Seiten, zahlreiche Abbildungen
ISBN 3-8273-7098-1

Die Integration von Elektronik, Elektrotechnik, Computer- und Regelungstechnik mit dem Maschinenbau gewinnt mehr und mehr an Bedeutung bei der Planung, Herstellung und Instandhaltung einer breiten Palette von technischen Produkten und Prozessen. Für diese integrative Betrachtungsweise steht der Begriff „Mechatronik“ als eine konsequente Herangehensweise, dass Ingenieure und Techniker über Fertigkeiten und Wissen verfügen müssen, die nicht nur auf ein einziges Fachgebiet beschränkt sind. Sie haben in der Lage zu sein über eine Reihe technischer Fachgebiete hinweg zu arbeiten und zu kommunizieren.

Dieses Buch stellt eine Einführung in die Grundlagen der Mechatronik dar. Es werden zunächst grundlegende Systemelemente wie Sensoren und Messumformer, Signalaufbereitung sowie Systeme zur Darstellung von Daten behandelt. Weiters werden Antriebe mit elektrischer, pneumatischer und hydraulischer Hilfsenergie eingehend erläutert. Breiten Raum nehmen die Systemmodelle ein, in deren Zusammenhang in die Grundlagen der klassischen Regelungstechnik eingeführt wird. Ein Kapitel behandelt die binäre Steuerungstechnik. Den Einfluss der Computertechnik auf die Mechatronik wird in dem Kapitel Mikroprozessorsysteme Rechnung getragen, wo sowohl Hardware als auch Software insbesondere Programmierung behandelt werden. Darüber hinaus finden Ein- und Ausgabesysteme, speichergrogrammierbare Steuerungen sowie Kommunikationssysteme Beachtung. Sehr wertvoll ist das Kapitel über Fehlersuche, welches fast in keinem Lehrbuch vorhanden ist. Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung mit Fallstudien mechatronischer Lösungen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass diese umfassende Behandlung der Grundbausteine der Mechatronik sowohl für in der Praxis stehende Techniker als auch für Studentenkurse im technischen Bereich verwendet werden kann.

P. Kopacek

Automatisierungstechnik

Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme

J. Lunze

Oldenbourg Wissenschaftsverlag GMBH 2003
607 Seiten, 401 Abbildungen
ISBN 3-486-27430-9

In der Automatisierungstechnik haben neben der Steuerung und Regelung dynamischer Prozesse in letzter Zeit die Prozessüberwachung sowie die Fehlerdiagnose zunehmende Bedeutung erlangt. Da diese Methoden auf einer systemtheoretischen Betrachtung des zu automatisierenden Prozesses beruhen, sind sie in allen technischen Gebieten und darüber hinaus in vielen nichttechnischen Bereichen einsetzbar.

Dieses Buch gibt eine breite Einführung in die grundlegenden Aufgaben und Methoden der Automatisierungstechnik und veranschaulicht diese an zahlreichen Anwendungsbeispielen. Das behandelte Themengebiet reicht von der Modellbildung über die Vorhersage des zukünftigen Systemverhaltens, den Entwurf von Regelungen und Steuerungen bis zu Zustandsbeobachtung und Prozessdiagnose.

Bisher wurden die Methoden für die Überwachung und Regelung kontinuierlicher Systeme getrennt von den Methoden für ereignisdiskreter Systeme entwickelt. Diese Buch versucht zum ersten Mal beide Systeme gleichzeitig zu behandeln, wobei die Abschnitte über ereignisdiskrete Systeme auf den Arbeiten des Autors und seiner Mitarbeiter in den letzten Jahren beruht.

Das Buch kann in drei Teile gegliedert werden. Im ersten Teil, der Einführung werden die Ziele und Aufgaben der Automatisierungstechnik behandelt und Methoden für die strukturelle Darstellung und Analyse von dynamischen Systemen eingeführt. Teil zwei befasst sich mit der Automatisierung kontinuierlicher Systeme deren Verhalten durch Werte kontinuierlicher Signale dargestellt und deshalb durch Differentialgleichungen beschreibbar sind. Grundlage dafür ist die Zustandsraumdarstellung welche sowohl für lineare und nichtlineare Systeme behandelt wird. Es werden wichtige Systemeigenschaften wie Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit sowie Stabilität erläutert und einfache Verfahren für den Reglerentwurf sowie Methoden für die Zustandsbeobachtung und Fehlerdiagnose dargestellt. Der dritte Teil beschäftigt sich mit der Automatisierung diskreter Systeme, deren Verhalten durch Folgen von Ereignissen beschrieben wird. Als Modellformen werden deterministische, nichtdeterministische und stochastische Automaten sowie Petrinetze eingeführt. Diese Methoden werden für die Verhaltensanalyse, den Steuerungsentwurf, die Zustandsbeobachtung sowie die Fehlerdiagnose eingesetzt.

Zum Verständnis des Buches sind Vorkenntnisse auf den Gebieten der Matrizenrechnung und der linearen gewöhnlichen Differentialgleichungen erforderlich. Da die Systeme ausschließlich im Zeitbereich behandelt werden, sind keine Kenntnisse über Funktionaltransformationen erforderlich. Allerdings sind die Kenntnisse einfacher Begriffe der Graphentheorie und der Mengenlehre Voraussetzung zum Verständnis von Kapitel 3.

Das Buch entstand aus den Vorlesungen des Autors an der Ruhr-Universität Bochum und soll den Studenten eine Einführung in das Gesamtgebiet der Automatisierungstechnik geben, kann aber auch den in der Praxis stehenden Fachleuten wärmsten empfohlen werden.

Automatisierungstechnik

Mit Informatik und Telekommunikation

Grundlagen – Komponenten – Systeme

Autorenkollektiv

Verlag Europa-Lehrmittel, 6. Auflage, 2004

480 Seiten, mehr als 1200 Abbildungen

ISBN 3-8085-5156-9

Dieses reich bebilderte Buch – über 1200 meist mehrfarbige Bilder oder Tabellen – vermittelt den Lehrstoff wie dieser im Bereich der Automatisierungstechnik und Mechatronik in den Fachschulen der Technik gelehrt wird. Es ist auch für den Bereich der beruflichen Weiterbildung gedacht.

Dieses Lehrbuch gibt zunächst eine Einführung in den modernen Geschäftsprozess des Produkt-Daten-Management (PDM) und führt den Nutzer in ein ganzheitliches Denken ein. Beginnend mit den Komponenten über Automatisierungstechnik, welche einerseits mechanische, elektrische, elektronische und optische Hardware sind, gesellt sich die Software.

Mit diesem Buch werden die elementarsten technisch-physikalischen Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik vermittelt. Es werden Hard- und Softwarekomponenten der Automatisierung behandelt und in die moderne Systemwelt der Produktion und Kommunikation eingeordnet.

Es gliedert sich in die Hauptabschnitte Produkt-Daten-Management und Einführung in die Automatisierung, Grundlagen der Automatisierungstechnik, SPS-Technik, pneumatische, hydraulische und elektrische Aktoren, Sensortechnik, Computer gesteuerte Maschinen, Montage und Demontage, Qualitätsmanagement, Informationstechnik, Kommunikationstechnik und Telematik.

Die vorliegende sechste Auflage unterscheidet sich von der letzten durch Aufnahme der Abschnitte ProTool für das Bedienen und Beobachten von Prozessen und Virtual Environment (VE) zur Prozessvisualisierung mit 3D-Systemen.

P. Kopacek

Navigation mobiler, kooperativer Roboter

Dipl.-Ing. Bernhard Putz

Begutachter: o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Techn. Dr. h. c. mult. Peter Kopacek

In der vorliegenden Arbeit wird eine zur Forschung an mobilen, kooperativen und intelligenten Robotern entwickelte Plattform beschrieben, die als preiswerte Testumgebung für zukünftige industrielle Anwendungen dient.

Hauptziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Mehrrobotersystems mit hoher Datenverarbeitungsgeschwindigkeit und geringen Verzögerungszeiten. Dazu war es notwendig, sowohl neue Roboter mit nichtholonomen Bindungen zu konstruieren, als auch neue Methoden für die Navigation und Kommunikation zu entwickeln und zu testen.

Als erster Schritt wurde ein externes, bildbasiertes Positionserkennungssystem implementiert, dessen Kalibrierungsaufwand sich trotz unterschiedlichster Umgebungsbedingungen auf wenige Parameter beschränkt. Die präzise, gleichzeitige Verfolgung von über 20 Robotern stellt eine Grundvoraussetzung für das nachfolgende Navigationskonzept dar. Die vorgestellten Methoden orientieren sich an reaktiven Verhaltensmustern (behavior-based approach) und unterstützen die strategische Bahnplanung mit speziell für zweirädrige Roboter angepasste Positionsfunktionen und Vorhersagealgorithmen. Dabei erlaubt die übersichtliche Softwarestruktur eine flexible Einbindung neuer Ansätze.

Für die Kommunikation wurde ein detailliertes echtzeitfähiges Funkprotokoll für variable Übertragungsgeschwindigkeit und variabler Anzahl von Robotern entwickelt. Es nützt die Vorteile der verwendeten Übertragungsmodule, die bidirektional mit fester Frequenz und geringer Verzögerungszeit arbeiten.

Um die Abmessungen der Testplattform so gering wie möglich zu halten, wurden zwei kompakte mobile Roboter konstruiert, die weniger als 80 bzw. 230 cm³ Volumen benötigen, aber dennoch Geschwindigkeiten bis zu 3,5 m/s bei Beschleunigungen von über 10 m/s² erreichen. Streng definierte Echtzeitbedingungen ermöglichen eine schnelle und exakte Regelung.

Das Ergebnis ist ein Mehrrobotersystem, das aus schnellen, mobilen und kooperativen Minirobotern besteht. Die hier entwickelten Methoden liefern einen wesentlichen Beitrag zum zukünftigen Einsatz in der Industrie und im Privatbereich.

Fertiggestellte Diplomarbeiten

Roboter zur Aus- und Weiterbildung

Wanda Milowanowa; IHRT, TU Wien

Beitrag zur semiautomatisierten Demontage

Nihat Dikme; IHRT, TU Wien

Neural Net Controlled Autonomous Hyper-Redundant Manipulator Systems

Martin Brazda; IHRT, TU Wien

<i>Datum</i>	<i>Veranstaltung</i>	<i>Ort</i>	<i>Weitere Informationen erhältlich bei:</i>
8.-10.6.2005	American Control Conference – in co-operation with IFAC -	<i>Portland OR, USA</i>	e-mail: SJayasuriya@mengr.tamu.edu http://www.ee.washington.edu/conf/acc2005/
4.-8.7.2005	16 th IFAC WORLD CONGRESS	<i>Prague Czech Republic</i>	http://www.ifac.cz
12.-15.9.2005	CLAWAR 2005 8 th International Conference on Climbing and Walking Robots	<i>London UK</i>	e-mail: clawar2005@sheffield.ac.uk http://www.clawar.net/clawar2005/
14.-17.9.2005	ICINCO/IFAC Conference (2 nd) Informatics in Control, Automation and Robotics	<i>Barcelona Spain</i>	e-mail: secretariat@icinco.org http://www.icinco.org
28.-30.9.2006	EWICS Intl. Conference 24 th Computer Safety, Reliability and Security – SAFECOMP2005	<i>Fredrikstad Norway</i>	e-mail: safecomp2005@hrp.no http://www.safecomp.org
8.-10.2.2006	IFAC Symposium Mathematical Modelling – 5 th MATHMOD	<i>Vienna Austria</i>	e-mail: inge.troch@tuwien.ac.at http://simtech.tuwien.ac.at/MATHMOD/
26.-29.3.2006	IFAC Workshop Control Applications in Post-Harvest and Processing Technology CAPPT 2006	<i>Potsdam Germany</i>	e-mail: CAPPT2006@atb-potsdam.de http://CAPPT2006.atb-potsdam.de/
29.-31.3.2006	IFAC Symposium System Identification – SYSID 2006	<i>Newcastle Australia</i>	e-mail: secretariat@sysid2006.org http://sysid2006.org

2.-5.4.2006	IFAC Symposium Advanced Control of Chemical Processes – ADCHEM 2006	<i>Gramado Brazil</i>	e-mail: luciane@enq.ufrgs.br http://www.enq.ufrgs.br/adchem2006/
17.-19.5.2006	IFAC Symposium Information Control Problems in Manufacturing – INCOM 2006	<i>St. Etienne France</i>	e-mail: incom06@emse.fr http://www.emse.fr/incom.fr
21.-23.6.2006	IFAC Symposium 7 th Advances in Control Education – ACE 06	<i>Madrid Spain</i>	e-mail: ace2006@dia.uned.es http://www.dia.uned.es/ace2006/index.html
