

INHALT

Seite

CAUSHI, I. und KOPACEK, P. Einfluß der Konstruktions-Elastizitäten auf die Dynamik von Industrierobotern	1
WEINMANN, A. Time-Domain Identification in the Face of Unknown Initial Conditions	35
KOPACEK P. Robotics in Austria	44
SCHLAGLICHTER	51
DISSERTATIONSKURZFASSUNGEN	64
BUCHBESPRECHUNGEN	69
EIN INSTITUT STELLT SICH VOR Institut für Maschinen- und Prozeßautomatisierung der Fakultät Maschinenbau an der TU Wien	73
VORANKÜNDIGUNGEN	75
VERANSTALTUNGSKALENDER	76

Einfluß der Konstruktions-Elastizitäten auf die Dynamik von Industrierobotern

I.D. Çausi und P. Kopacek

Institut für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

Technische Universität Wien

Wien, Österreich

Kurzfassung

Auswirkungen von Massen- und Steifigkeitsreduktionen bei Industrierobotern durch die Simulation elastischer Modelle werden untersucht, um optimierte Strukturen bei Leichtbau-Industrierobotern zu erreichen. Aus der Analyse der Einflüsse der Roboterelastizitäten auf die dadurch entstehenden Schwingungen der Bewegungsgrößen werden Folgerungen zur Modellbildung bzw. Reglerentwurf gezogen. Ein Kriterium minimaler Energie zur Verteilung von Trägheitsparametern bei optimierten Leichtrobotern wird formuliert.

1. Modellierung eines Industrieroboters als elastisches Mehrkörpersystem

Für die meisten Industrieroboter von heute ist ihre Modellierung als Starrkörpersysteme für Simulationszwecke, wegen ihrer hohen Steifigkeiten, gerechtfertigt (Çausi, 1991), (Desoyer et al., 1985). Mit den erstrebten Massenreduktionen bei Industrierobotern in Leichtbauweise sind aber die Flexibilitäten (die Reziprokwerte der Steifigkeiten) der Roboterglieder, sowie die der Robotergelenke, nicht mehr zu vernachlässigen (Çausi, 1993). Dadurch entstehen die nicht vermeidbaren "elastischen" Schwingungen, die irgendwie kompensiert werden müssen. Dazu müssen sie aber erst durch geeignete Simulation des dynamischen Verhaltens des flexiblen (elastischen) schwingenden Roboters erfaßt werden.

Erhöhte Flexibilitäten der Roboterglieder und -gelenke beeinflussen Bahnführung und Positioniergenauigkeit, und bei hoher Last treten zusätzlich starke statische Verformungen auf. Unerwünschte Schwingungen, die durch elastische Eigenschaften der Roboter-elemente entstehen, vergrößern am Roboter den Verschleiß und beeinflussen ungünstig die Funktion (Positioniergenauigkeit), Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Arbeitsbedin-

gungen (durch Geräusche). Die Vorausberechnung des Schwingungsverhaltens von Robotern in der Konstruktionsphase verhindert Fehlentwicklungen. Eine Nachberechnung des Schwingungsverhaltens ist oft notwendig und ist billiger und schneller als Messungen.

Mit dem verwendeten Programmpaket für die Mehrkörperdynamik AUTOLEV kann man die elastischen Eigenschaften des (Starrkörperketten-) Robotersystems nur als Feder zwischen den Starrgliedern modellieren (Schaechter et al., 1988), (Kane und Levinson, 1983). Die Federkennzahlen können durch Messungen oder durch Berechnungen gewonnen werden. In diesem Abschnitt wird ein ausführlicher Weg zur Berechnung der Torsionsfederkennzahlen aus Messungen und den Konstruktionsangaben dargestellt. Da das Modell relativ vereinfacht wird, sollen die Torsionsfeder möglichst alle Elastizitäten der Systemelemente (Antriebssystem, Robotergelenke, und -Glieder) repräsentieren. Bei diesen Berechnungen spielt die genaue Reduktion der absoluten Steifigkeiten (bzw. Elastizitäten) auf die jeweiligen Reduktionszentren eine wichtige Rolle. Da bei AUTOLEV die Ursprünge der Koordinatensysteme in den Massenmittelpunkten der Starrkörper liegen, müssen alle Steifigkeiten auf diese Punkte reduziert werden.

Glied i	Massenmittelpunkte			Masse	Trägheitsmomente			Längen
	x_{Ci}	y_{Ci}	z_{Ci}		I_{xi}	I_{yi}	I_{zi}	
	m			kg	kgm ²			m
1 (A)	0.0000	0.3088	0.0389	12.96	2.353536	0.196992	2.347056	$a_2=0.4318$
2 (B)	-0.3289	0.0050	0.2038	22.37	1.333252	4.317410	3.386818	$a_3=0.0191$
3 (C)	0.0204	0.0137	0.0037	5.01	0.075651	0.077655	0.010521	$d_3=0.1505$
3 ¹⁾ (V)	0.0136	0.0092	0.1522	6.97	0.545751	0.547842	0.014637	$d_4=0.4331$
4 (D)	0.0000	0.0863	-0.0029	1.18	0.014042	0.003422	0.013924	
5 (E)	0.0000	-0.0102	0.0013	0.62	0.000558	0.000558	0.000558	
6 (K)	0.0000	0.0000	0.0029	0.16	0.000128	0.000128	0.000064	
Last	0.0000	0.0000	0.0000	4.00	0.0074756	0.0074756	0.002361	$l_L=0.140$

Tab. 1 Daten der Roboterglieder des Unimation PUMA 560

¹⁾ Greifer fest mit dem Glied 3 verbunden.

Als Untersuchungsexemplar wurde der (im Laboratorium des Institutes für Handhabungsgeräte und Robotertechnik der TU-Wien befindlicher) handelsüblicher Industrieroboter PUMA 560 herangezogen (Abb. 1).

Die Gliederdaten sowie die Getriebe- und Rotordaten des PUMA 560 sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt (Tarn et al., 1985), (Lugner et al., 1986).

Im hergestellten Modell werden die Elastizitäten der Roboterelemente in zwei Richtungen berücksichtigt: 1. um die zur jeweiligen Drehachse parallele und durch den Massenschwerpunkt gelegte Achse und 2. um die dazu und zur Gliedlängsachse senkrechte Achse. Für die Anfangslage als horizontal gestreckter Roboterarm ($q_1(0)=0^\circ$, $q_2(0)=0^\circ$, $q_3(0)=90^\circ$) heißt das, daß die Elastizitäten in vertikaler Ebene (Index V) bzw. in horizontaler Ebene (Index H) mitmodelliert werden. Weil man mit dem Modell des PUMA 560 bei sechs "starrten" Freiheitsgraden durch die beschränkte Anzahl der DIRCOS-Anweisungen von AUTOLEV an den Grenzen seiner Modellgröße kommt, wird beim elastischen Modellieren von drei "starrten" Freiheitsgraden der Greiferführungsgetriebe ausgegangen.

Gyro		Träg.mom. kgm ²	in Gl i	Übersetzungsverhältnisse bezüglich $u_k = \dot{q}_k$						Richtungscos		
Rot	Rad			\dot{q}_1	\dot{q}_2	\dot{q}_3	\dot{q}_4	\dot{q}_5	\dot{q}_6	α	β	γ
R1		1.98017×10^{-4}	0 (O)	62.55								
R2		1.98017×10^{-4}	2 (B)		107.8					1	0	0
R3		1.98017×10^{-4}	2 (B)			53.65				-1	0	0
R4		1.83660×10^{-5}	3 (C)				76.03			0	0	1
R5		1.83660×10^{-5}	3 (C)				1	71.92		0	0	1
R6		1.83660×10^{-5}	3 (C)				1	8.52	76.68	0	0	1
	G2	6.8×10^{-4}	2 (B)		9.69					0	0	1
	G3	2.6×10^{-4}	2 (B)			7.15				0	0	-1
	G6	6.3×10^{-5}	4 (D)					1	9	0	0	1

Tab. 2 Getriebe- und Rotordaten des Roboters Unimation PUMA 560

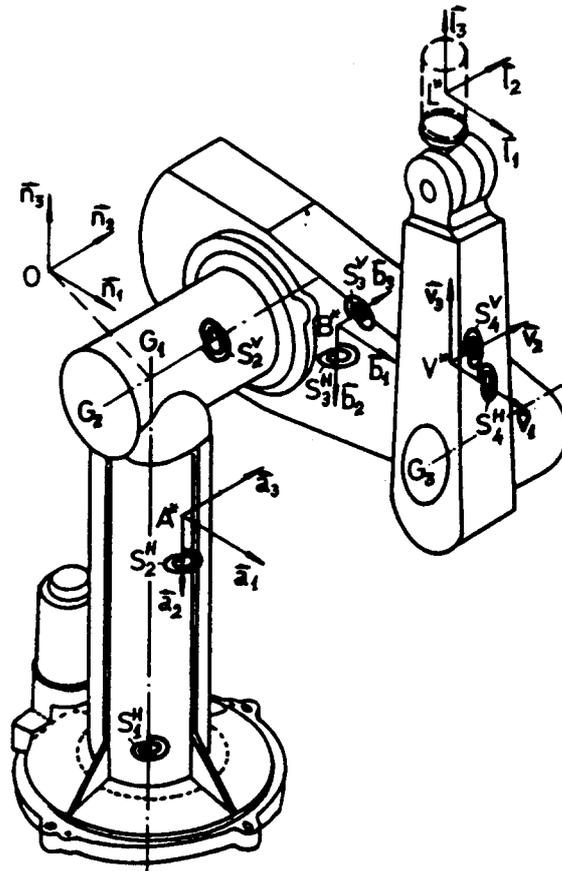


Abb. 1 Modell mit 7 elastischen Elementen des PUMA 560 (P7E)

Das größte elastische Modell wird also aus drei "starrten" und sieben "elastischen" Freiheitsgraden bestehen (Programm P7E). Zwei "elastische" Freiheitsgrade (H_4 bzw. V_4 , vertreten durch die Federkennzahlen s_4^H bzw. s_4^V) stellen die Flexibilitäten des Gliedes C um zwei senkrechte Achsen C^*c_1 bzw. C^*c_2 zwischen Greifer + Last und dem Massenmittelpunkt C^* dar. Zwei weitere FG (H_3 bzw. V_3) vertreten die Elastizitäten des zweiten Gelenkes und des Gliedes B um zwei senkrechte Koordinatenachsen B^*b_2 bzw. B^*b_3 , zwei zusätzliche FG (H_2 bzw. V_2) sind für die Elastizitäten des zweiten Gelenkes um die Achsen G_2 bzw. A^*a_3 notwendig. Der letzte "elastische" Freiheitsgrad (H_1) vertritt die Elastizität des ersten Antriebes und die des ersten Robotergliedes in der horizontalen Ebene.

1.1 Berechnung der äquivalenten Steifigkeiten

Für das komplette elastische Modell P7E werden die Steifigkeiten der Ersatzfeder teilweise aus Messungen und teilweise aus Berechnungen zusammengestellt. Die Steifigkeiten zweier in die Gelenke G_2 bzw. G_3 gelegten Torsionsfedern, welche die Elastizitäten des jeweiligen Gliedes und Gelenkes repräsentieren, sind durch Messungen bestimmt (Whitney et al., 1984). Die sich ergebenden Daten passen für ein Modell mit starren Gliedern, die durch elastische Gelenke verbunden sind, wobei die Gelenke als Torsionsfedern mit den Steifigkeiten

$$s_{2-2}^V = 7.7 \times 10^4 \text{ Nm rad}^{-1} \quad (1)$$

$$s_{3-3}^V = 1.6 \times 10^4 \text{ Nm rad}^{-1} \quad (2)$$

wirken. Diese Werte werden für das Simulationsmodell auf Torsionsfederkennzahlen an den Gliederschwerpunkten umgerechnet.

Berechnung der Federkennzahl s_4^H :

Glied C ist eine Aluminiumgehäuse ($E_{Al} = 7.1 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$ (Hütte, 1989) mit einem Hohlquerschnitt der aktiven Länge $l_c = 0.5 \text{ m}$, einem durchschnittlichen Querschnitt $H_C \times B_C = 0.09 \text{ m} \times 0.12 \text{ m}$ und einer Wanddicke von $t_c = 0.0015 \text{ m}$ (Abb. 2).

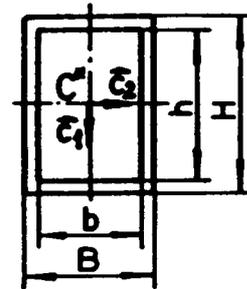


Abb. 2 Querschnitt von Glied C

Das Flächenträgheitsmoment des Gliedes C um die Achse C^*c_1 lautet:

$$I_{1C} = \frac{H_C B_C^3 - h_C b_C^3}{12} = \frac{0.12 \times 0.09^3 - 0.117 \times 0.087^3}{12} = 8.6959575 \times 10^{-7} \text{ m}^4 \quad (3)$$

Die Steifigkeit einer am Greifermittelpunkt angenommenen linearen Feder, welche die Elastizität des Gliedes C um die C^*c_1 -Achse darstellt, ist (siehe Hütte, 1989):

$$c_C^H = \frac{3EI_{1C}}{l_c^3} = 1.481791158 \times 10^6 \text{ Nm}^{-1} \quad (4)$$

Die Steifigkeit der für das Glied C äquivalenten Torsionsfeder mit Drehachse C^*c_1 ist:

$$s_C^H = c_C^H \times (C \cdot G)^2 = 1.4817912 \times 10^6 \times (0.5 - 0.1522)^2 = 1.792446 \times 10^5 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (5)$$

Die gesamte reduzierte Steifigkeit vom Greifer zum Massenmittelpunkt C^* , um die Achse C^*c_1 , ist:

$$s_4^H = s_C^H = 1.792446303 \times 10^5 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (6)$$

Berechnung der Federkennzahl s_4^V :

Das Flächenträgheitsmoment des Gliedes C um die Achse C^*c_2 ist:

$$I_{2C} = \frac{B_C H_C^3 - b_C h_C^3}{12} = \frac{0.09 \times 0.12^3 - 0.087 \times 0.117^3}{12} = 1.34830575 \times 10^{-6} \text{ m}^4 \quad (7)$$

Die Steifigkeit einer am Greifermittelpunkt angenommenen linearen Feder, welche die Elastizität des Gliedes C um die C^*c_2 -Achse darstellt, ist:

$$c_C^V = \frac{3EI_{2C}}{l_C^3} \quad (8)$$

Die gesamte reduzierte Torsionssteifigkeit für das Glied C, vom Greifer zum Massenmittelpunkt C^* um die Achse C^*c_2 , ist gleich der Steifigkeit der äquivalenten Torsionsfeder mit einer Drehachse C^*c_2 :

$$s_4^V = s_C^V = c_C^V (C \cdot G)^2 = \frac{3EI_{2C}}{l_C^3} (C \cdot G)^2 = \frac{3 \times 7.1 \times 10^{10} \times 1.34830575 \times 10^{-6}}{0.5} \times (0.5 - 0.1522)^2 = 2.779182922 \times 10^5 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (9)$$

Berechnung der Federkennzahlen s_3^H und s_3^V aus der Steifigkeit des Gliedes B und des Gelenkes G_3 :

Die Gesamtnachgiebigkeit des Gelenkes G_3 , das außerhalb der Lager angeordnet ist, um eine zu C^*c_1 parallele Achse ist (Rivin, 1988):

$$\delta'' = \frac{4}{\pi} \frac{Pk_2}{db} \left(1 + \frac{d}{D}\right) \quad [m] \quad (10)$$

wobei

P ... Radialkraft [N]

d ... Innendurchmesser [m]

D ... Außendurchmesser [m]

b ... Lagerbreite [m]

$k_2 = 5 + 25 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ N}^{-1}$. Niedrigere Werte von k_2 zählen für Teile mit hoher Oberflächenbeschaffenheit und leichter Passung (Interferenz) und/oder hoher Belastung. Die höheren Werte gelten für Teile mit normaler Oberflächenbeschaffenheit (gepreßt) und/oder niedriger Belastung.

Die Hertz'schen Deformationen der Rollkugeln in den zwei Kugellagern sind nichtlinear und können dargestellt werden als:

$$\delta' = (0.15 + 0.44d) \times 10^6 P^{2/3} \quad [m] \quad (11)$$

Die Gesamtflexibilität (auf die Achse On_3 reduziert) des Gelenkes G_3 um die On_3 -Achse ist (Rivin, 1988):

$$e_{G_3}^H = 3.84 \times 10^{-6} \text{ rad N}^{-1} \text{ m}^{-1} \quad (12)$$

Die Steifigkeit einer am Gelenkmittelpunkt G_3 angenommenen linearen Feder, welche die Elastizität des Gelenkes G_3 um die vertikale On_3 -Achse repräsentiert, ist:

$$c_{G_3}^H = \frac{1}{e_{G_3}^H (OG_3)^2} = \frac{1}{3.84 \times 10^{-6} (0.4318^2 + 0.184^2)} = 1.182100166 \times 10^6 \text{ Nm}^{-1} \quad (13)$$

Glied B ist ein hohler Balken aus Aluminium mit einer aktiven Länge von $l_B = 0.45 \text{ m}$, einem durchschnittlichen Querschnitt $H_B \times B_B = 0.227 \text{ m} \times 0.105 \text{ m}$ und einer Wanddicke von $t_B = 0.003 \text{ m}$ (Abb. 3).

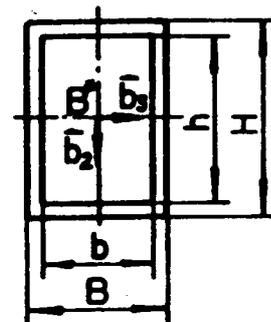


Abb. 3 Querschnitt von Glied B

Das Flächenträgheitsmoment des Gliedes B um die Achse B^*b_2 ist:

$$I_{2b} = \frac{H_B B_B^3 - h_B b_B^3}{12} = \frac{0.227 \times 0.105^3 - 0.221 \times 0.099^3}{12} = 4.028733 \times 10^{-6} \text{ m}^4 \quad (14)$$

Die Durchbiegung des Balkenendes lautet (Hütte, 1989):

$$w_B^H = \frac{1}{3} \frac{Fl_B^3}{EI_{2B}} + \frac{1}{2} \frac{Ml_B^2}{EI_{2B}} = \frac{F}{EI_{2B}} \left(\frac{l_B^3}{3} + \frac{l_C \times l_B^2}{2} \right) = F \times 2.831771354 \times 10^{-7} \text{ mN}^{-1} \quad (15)$$

Die Steifigkeit einer am Gelenkmittelpunkt G_3 angenommenen linearen Feder, welche die Elastizität des Gliedes B um die Achse B^*b_2 darstellt, ist:

$$c_B^H = \frac{F}{w_B^H} = 3.531358556 \times 10^6 \text{ Nm}^{-1} \quad (16)$$

Für die seriengeschalteten linearen Federn am Gelenkmittelpunkt G_3 ist folgende Beziehung für die gemeinsame Steifigkeit bekannt:

$$\frac{1}{c_{G_3+B}^H} = \frac{1}{c_{G_3}^H} + \frac{1}{c_B^H} \quad (17)$$

woraus

$$c_{G_3+B}^H = 8.856382925 \times 10^5 \text{ Nm}^{-1} \quad (18)$$

Die Steifigkeit der für das Gelenk G_3 und das Glied B äquivalenten Torsionsfeder mit Drehachse B^*b_2 ist:

$$s_3^H = c_{G_3+B}^H \times (B^*G_3)^2 = 8.85638292 \times 10^5 \times 0.3289^2 = 9.580410828 \times 10^4 \text{ Nm rad}^{-1} \quad (19)$$

Die aus Messungen bestimmte Torsionssteifigkeit $s_{3,3}^V$ beinhaltet den entsprechenden Anteil des Gliedes C ($s_{C(G_3)}^V$) und den Anteil des Gelenkes G_3 . Im Simulationsmodell werden diese Anteile durch verschiedene Federkennzahlen (s_4^V bzw. s_3^V) berücksichtigt. Daher müssen sie zuerst aufgeteilt werden.

Die Torsionssteifigkeit einer Ersatzfeder für das Glied C (um die Achse G_3) ist:

$$s_{C(G_3)}^V = c_C^V \times (G_3G)^2 = 4.30957421 \times 10^5 \text{ Nm rad}^{-1} \quad (20)$$

Aus der Beziehung

$$\frac{1}{s_{3-3}^V} = \frac{1}{s_{C(G_3)}^V} + \frac{1}{s_{G_3}^V} \quad (21)$$

findet man:

$$s_{G_3}^V = 1.661693079 \times 10^4 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (22)$$

Die Steifigkeit einer am Gelenkmittelpunkt angenommenen linearen Feder, welche die Elastizität des Gliedes B um die Achse B^*b_3 vertritt, ist:

$$c_B^V = \frac{F}{W_B^V} \quad (23)$$

Mit

$$w_B^V = \frac{F}{EI_{3B}} \left(\frac{l_B^3}{3} + \frac{l_C \times l_B^2}{2} \right) \quad \text{und} \quad I_{3B} = \frac{B_B H_B^3 - b_B h_B^3}{12} \quad (24)$$

findet man

$$c_B^V = 1.165813251 \times 10^7 \text{ Nm}^{-1} \quad (25)$$

Die Steifigkeit der für das Gelenk G_3 und das Glied B äquivalenten Torsionsfeder mit Drehachse B^*b_3 findet man aus:

$$\frac{1}{s_3^V} = \frac{1}{s_{G_3}^V} + \frac{1}{s_B^V} = \frac{1}{s_{G_3}^V} + \frac{1}{c_B^V \times (B^*G_3)^2} \quad (26)$$

woraus:

$$s_3^V = 1.640082826 \times 10^4 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (27)$$

Berechnung der Federkennzahl s_2^H :

Die auf die Achse On_3 reduzierte Gesamtflexibilität des Gelenkes G_2 um die On_3 -Achse ist (Rivin, 1988):

$$e_{G_2}^H = 1.39 \times 10^{-6} \text{ rad N}^{-1} \text{ m}^{-1} \quad (28)$$

Die Steifigkeit einer am Gelenkmittelpunkt G_2 angenommenen linearen Feder, welche die Elastizität des Gelenkes G_2 um die vertikale Achse On_3 vertritt, ist:

$$c_{G_2}^H = \frac{1}{e_{G_2}^H \times r_{OG_2}^2} = \frac{1}{1.39 \times 10^{-6} \times 0.1505^2} = 3.176231876 \times 10^7 \text{ Nm}^{-1} \quad (29)$$

Die Steifigkeit der äquivalenten Torsionsfeder mit einer Drehachse A^*a_2 für das Gelenk G_2 ist:

$$s_2^H = c_{G_2}^H \times (A \cdot G_2)^2 = 8.636812893 \times 10^5 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (30)$$

Berechnung der Federkennzahl s_2^V :

Die Torsionssteifigkeit einer Ersatzfeder für das Glied B (um die Achse G_2) ist:

$$s_{B(G_2)}^V = c_B^V \times (G_2 G_3)^2 = 2.173673263 \times 10^6 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (31)$$

Aus der Beziehung der seriengeschalteten Torsionsfeder

$$\frac{1}{s_{2-2}^V} = \frac{1}{s_{B(G_2)}^V} + \frac{1}{s_{G_2}^V} \quad (32)$$

findet man

$$s_2^V = s_{G_2}^V = 7.982781307 \times 10^4 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (33)$$

Berechnung der Federkennzahl s_1^H :

Glied A ist ein Hohlzylinder aus Aluminium mit einem Außendurchmesser von $D_A = 0.165$ m, einer Wanddicke $t_A = 0.007$ m und einer Länge $l_A = 0.566$ m. Die Torsionssteifigkeit dieses Hohlzylinders ist:

$$s_A^H = \frac{G I_P}{l_A} \quad (34)$$

Mit

$$I_P = \frac{\pi (D_A^4 - d_A^4)}{32} = 2.172755167 \times 10^{-5} \text{ m}^4 \quad (35)$$

und

$$G_{Al} = \frac{E}{2(1 + \nu_{Al})} = \frac{7.1 \times 10^{10}}{2(1 + 0.34)} = 2.649253731 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2} \quad (36)$$

findet man:

$$s_A^H = 1.016992886 \times 10^6 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (37)$$

Die auf das große Zahnrad (am ersten Glied montiert) reduzierte Torsionssteifigkeit der letzten Untersetzungsstufe des ersten Getriebes ist gekennzeichnet durch

$k_m = 6 \times 10^{11} \text{ m}^2\text{N}^{-1}$, $b_A = 0.0075 \text{ m}$, $R_A = 0.165 \text{ m}$ und $\alpha = 20^\circ$:

$$s_{G_1}^H = \frac{b_A R_A \cos^2 \alpha}{k_m} = 3.005034998 \times 10^6 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (38)$$

In diesem Fall wird die Leistung durch zwei vorbelastete Ritzel (antibacklash design Δ Konstruktion ohne freies Spiel) zum großen Zahnrad übertragen. Wegen dieser Vorbelastung wird die Steifigkeit der Übertragung verdoppelt:

$$s_{G_1}^H = 2 \times s_{G_1}^H = 6.010069994 \times 10^6 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (39)$$

Die Steifigkeit einer für das Glied A und das erste Getriebe äquivalenten Torsionsfeder wird als gemeinsame Steifigkeit ihrer seriengeschalteten vertretenden Torsionsfedern berechnet:

$$\frac{1}{s_1^H} = \frac{1}{s_{G_1}^H} + \frac{1}{s_A^H} \quad (40)$$

woraus:

$$s_1^H = 8.698084151 \times 10^5 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (41)$$

Die Federkennzahlen für das Modell P7E (Programm P7E), sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

s_1^H	8.698084151×10^5		
s_2^H	8.636812893×10^5	s_2^V	7.982781307×10^4
s_3^H	9.580410828×10^4	s_3^V	1.640082826×10^4
s_4^H	1.792446303×10^5	s_4^V	2.779182922×10^5

Tab. 3 Federkennzahlen für das Modell P7E [Nmrad⁻¹]

Zu Vergleichszwecken wird auch ein vereinfachtes Robotermodell mit drei "starren" Freiheitsgraden und nur zwei "elastischen" Freiheitsgraden erstellt (Abb. 4) (Programm P2E).

Das erste elastische Element vom Modell P2E vertritt alle Elastizitäten um die jeweiligen Achsen, die in der Anfangslage vertikal stehen (reduziert auf die A^*a_1 -Achse).

Daher werden die entsprechenden Federkennzahlen zuerst auf die A^*a_1 -Achse reduziert:

$$s_1^{HA} = s_1^H = 8.698084151 \times 10^5 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (42)$$

$$s_2^{HA} = s_2^H \frac{(OG_2)^2}{(A^*G_2)^2} = s_2^H \times \frac{0.2038^2}{(0.2038 - 0.0389)^2} = 1.319230123 \times 10^6 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} s_3^{HA} &= s_3^H \frac{(OG_3)^2}{(B^*G_3)^2} = s_3^H \frac{(a_2^2 + d_3^2)}{(B^*G_3)^2} \\ &= s_3^H \times \frac{0.4318^2 + 0.1505^2}{0.3289^2} = 1.506618205 \times 10^5 \text{ Nmrad}^{-1} \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} s_4^{HA} &= s_4^H \frac{(OL^*)^2}{(C^*L^*)^2} = s_4^H \frac{(a_2 + G_3L^*)^2}{(G_3L^* - z_C)^2} \\ &= s_4^H \times \frac{(0.4318 + 0.57)^2 + 0.1505^2}{(0.57 - 0.1522)^2} = 1.053813918 \times 10^6 \text{ Nmrad}^{-1}. \end{aligned} \quad (45)$$

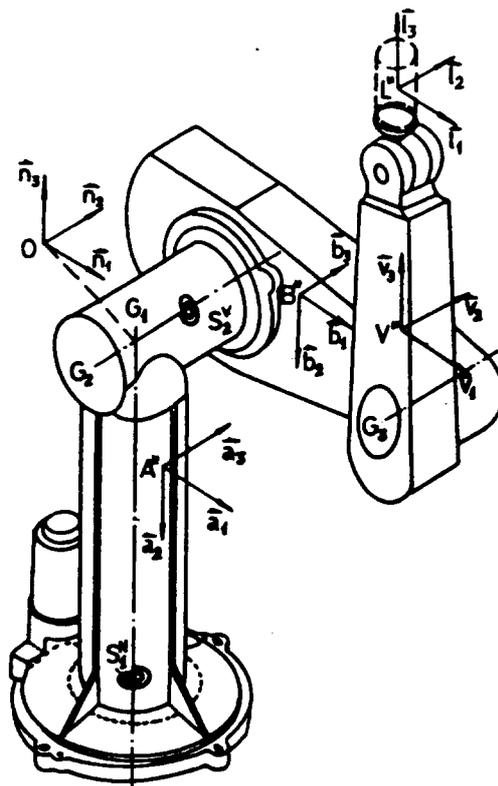


Abb. 4 Modell mit 2 elastischen Elementen des PUMA 560 (P2E)

Die zusammengestellte Steifigkeit ${}^2s_1^V$ wird durch Addition der Steifigkeiten aller dieser in Serie geschalteten Federn berechnet:

$$\frac{1}{{}^2s_1^H} = \frac{1}{s_1^{HA}} + \frac{1}{s_2^{HA}} + \frac{1}{s_3^{HA}} + \frac{1}{s_4^{HA}} \quad (46)$$

woraus:

$${}^2s_1^H = 1.053295477 \times 10^5 \text{ Nm rad}^{-1} \quad (47)$$

Dasselbe Rechenschema wird auch für das zweite elastische Element verwendet, das alle auf das Gelenk G_2 reduzierten Elastizitäten in vertikaler Ebene vertritt:

$$s_2^{VA} = s_2^V = 7.982781307 \times 10^4 \text{ Nm rad}^{-1} \quad (48)$$

$$s_3^{VA} = s_3^V \frac{(G_2 G_3)^2}{(B^* G_3)^2} = s_3^V \frac{a_2^2}{|x_{B^*}|^2} = s_3^V \times \frac{0.4318^2}{0.3289^2} = 2.826853552 \times 10^4 \text{ Nm rad}^{-1} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} s_4^{VA} &= s_4^V \frac{(G_2 L^*)^2}{(C^* L^*)^2} = s_4^V \frac{a_2 + G_3 L^*}{(G_3 L^* - z_{C^*}^*)^2} \\ &= s_4^V \times \frac{(0.4318 + 0.57)^2}{(0.57 - 0.1522)^2} = 1.597873211 \times 10^6 \text{ Nm rad}^{-1} \end{aligned} \quad (50)$$

$$\frac{1}{{}^2s_2^V} = \frac{1}{s_2^{VA}} + \frac{1}{s_3^{VA}} + \frac{1}{s_4^{VA}} \quad (51)$$

Daraus erhält man:

$${}^2s_2^V = 2.060673914 \times 10^4 \text{ Nm rad}^{-1} \quad (52)$$

Bei den Simulationen mit einem starren Robotermodell (Çaushi, 1991,), (Çaushi, 1993) wurden die dynamischen Folgen einer Massenreduktion aller Roboterglieder um 30% bzw. einer Reduktion nur des zweiten, dritten und vierten Gliedes um 40% analysiert. Es ist vernünftig, die dynamischen Auswirkungen solcher Massenverminderungen vor einer möglichen Umkonstruktion, an Hand eines realistischeren elastischen Modells (P7E) zu untersuchen. Zu diesem Zweck sollen hier vorerst die neuen Werte der Steifigkeiten $s_1^H, s_2^H, s_2^V, \dots, s_4^V$ zufolge der Steifigkeitsverminderung, sowohl der Roboter-

glieder als auch der Gelenke, berechnet werden.

Wie angenommen wurde, bleiben die (großen) Abmessungen der Roboterglieder erhalten. Das heißt, eine Massenreduktion kann zufolge der Verminderung der Wanddicke der Tragkonstruktion (bei Beibehaltung desselben Materials) als auch der Verminderung der innenliegenden Elemente zustande kommen, wo eine gleichmäßige Massenverminderung der Tragkonstruktion und der anderen Elemente angenommen wird.

Berechnung der Federkennzahlen bei einer Massenreduktion um 30%, bei allen Gliedern:

Bei der Beibehaltung des gleichen Materials muß für eine 30%-ige Massenreduktion der Tragkonstruktion eine 30%-ige Reduktion ihrer Querschnittsfläche realisiert werden.

Aus den Beziehungen

$$A^{B,C} = BH - bh = BH - (B - 2t)(H - 2t) = 2t(B + H - 2t) \quad (53)$$

$$A^A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \pi t(D - t) \quad (54)$$

findet man, daß einer 30%-igen Verminderung der Querschnittsflächen eine ungefähr 30%-ige Reduktion ihrer Wanddicke entspricht. Das heißt

$$t_C^* = 0.7 \times t_C \quad t_B^* = 0.7 \times t_B \quad \text{und} \quad t_A^* = 0.7 \times t_A. \quad (55)$$

Mit diesen neuen Werten wird die Verminderung der Flächenträgheitsmomente gefunden, was einer Verminderung der entsprechenden Steifigkeiten entspricht. Für die Robotergelenke wird eine 30%-ige Verminderung ihrer Biegesteifigkeiten angenommen. Die neuen Werte für die Federkennzahlen werden aus den folgenden Beziehungen berechnet:

$$s_4^{H^*} = 0.71 \times s_4^H, \quad s_4^{V^*} = 0.7086 \times s_4^V \quad (56)$$

$$c_B^{H^*} = 0.699 \times c_B^H, \quad c_B^{V^*} = 0.71 \times c_B^V \quad (57)$$

$$\frac{1}{c_3^{H^*}} = \frac{1}{0.7 \times c_{G_3}^H} + \frac{1}{0.699 \times c_B^H} \quad (58)$$

$$s_3^{H^*} = (B \cdot G_3)^2 c_3^{H^*} \quad (59)$$

$$\frac{1}{s_3^{V^*}} = \frac{1}{0.7 \times s_{G_3}^V} + \frac{1}{0.71 \times c_B^V \times (B \cdot G_3)^2} \quad (60)$$

$$s_2^{H^*} = 0.7 \times s_2^H, \quad s_2^{V^*} = 0.7 \times s_2^V \quad (61)$$

$$s_A^{H^*} = 0.7275 \times s_A^H \quad (62)$$

$$\frac{1}{s_1^{H^*}} = \frac{1}{0.7 \times s_{G_1}^H} + \frac{1}{0.7275 \times s_A^H} \quad (63)$$

Die neuen Werte der Federkennzahlen für das Modell P7E sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

$s_1^{H^*}$	6.292081301×10^5		
$s_2^{H^*}$	6.045769025×10^5	$s_2^{V^*}$	5.587946915×10^4
$s_3^{H^*}$	6.703882312×10^4	$s_3^{V^*}$	1.161552853×10^4
$s_4^{H^*}$	1.272636931×10^5	$s_4^{V^*}$	1.969329213×10^5

Tab. 4 Federkennzahlen für das Modell P7E bei einer allgemeinen 30%-igen Massenreduktion [Nmrad⁻¹]

Wenn man die Steifigkeiten an der linken Spalte der Tabelle 4 auf die O_n -Achse bzw. die Steifigkeiten der rechten Spalte auf die $A^*_{a_3}$ -Achse reduziert und dann jeweils nach dem Schema der Serienschaltung addiert, bekommt man die neuen Federkennzahlen ${}^2s_1^{H^*}$ bzw. ${}^2s_1^{V^*}$ für das Modell P2E:

$${}^2s_1^{H*} = 8.52832381 \times 10^4 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (64)$$

$${}^2s_1^{V*} = 1.45502213 \times 10^3 \text{ Nmrad}^{-1} \quad (65)$$

Dieselbe Rechenprozedur wurde zur Berechnung der Federkennzahlen bei einer 40%igen Massenreduktion nur des 2., 3. und 4. Gliedes verwendet.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengefaßt.

P7E			
s_1^{H**}	8.698084151×10^5		
s_2^{H**}	5.182087736×10^5	s_2^{V**}	4.789668784×10^4
s_3^{H**}	5.790084561×10^4	s_3^{V**}	9.842965874×10^3
s_4^{H**}	1.093392221×10^5	s_4^{V**}	1.694745712×10^5
P2E			
${}^2s_1^{H**}$	7.749841671×10^4	${}^2s_2^{V**}$	1.236886890×10^4

Tab. 5 Federkennzahlen für die Modelle P7E bzw. P2E bei einer 40%-igen Massenreduktion des 2., 3. und 4. Gliedes [Nmrad⁻¹]

2. Analyse der Simulationsergebnisse

Wegen der hohen Steifigkeiten des in Betracht gezogenen Roboters PUMA 560 sind Schwingungen mit sehr kleinen Amplituden und hohen Frequenzen zu erwarten. Um die Abweichungen der realistischeren elastischen Modelle P7E und P2E gegenüber dem starren Modell P3R zu erfassen und graphisch darzustellen, wurde bei den entsprechenden Simulationen ein Zeitschritt von 0.002 s gewählt. Das heißt, daß innerhalb der betrachteten Laufzeit von 0.5 s, jeweils 250 Punkte für jede simulierte Bewegungsgröße berechnet und aufgezeichnet worden sind.

2.1 Einfluß der Elastizitäten auf die Bewegungsgrößen

Die folgende Analyse soll zeigen, wie weit heutzutage konventionelle Industrieroboter, wie z.B. PUMA 560, als starre Konstruktionen angesehen werden dürfen und welche Bewegungsgrößen durch die vorhandenen (kleinen) Elastizitäten am meisten beeinflusst werden.

Zu diesem Zweck werden hier die Verläufe der Bewegungsgrößen der elastischen Modelle P7E und P2E mit den jeweiligen Verläufen des starren Modells P3R bei sprungförmigen Steuerspannungen ($U_{Si}=0$ für $t=0$ und $|U_{Si}|=18$ V für $t > 0$, $i=1, 2, 3$) während einer Laufzeit von 0.5 s verglichen.

In den folgenden Abbildungen bedeuten:

- P7E (Modell mit 3 starren und 7 elastischen Elementen)
- - P2E (Modell mit 3 starren und 2 elastischen Elementen)
- P3R (Modell mit 3 starren Elementen).

Die simulierte Bewegung beginnt von der angenommenen Anfangslage eines horizontal gestreckter Roboterarm ($q_1(0)=0^\circ$, $q_2(0)=0^\circ$, $q_3(0)=90^\circ$). Die "Spannungsversorgung" ($U_{S1}=+18$ V, $U_{S2}=-18$ V, $U_{S3}=-18$ V, siehe Abb. 5) der Simulation ist in der Weise gedacht, daß sich das erste Glied in positiver Drehrichtung um die vertikale Drehachse dreht, während sich das zweite und das dritte Glied nach oben, d.h. in negativer Drehrichtung, bewegen.

Beim Drehwinkel $q_1(t)$ des ersten Gliedes merkt man kaum den Unterschied zwischen den elastischen Modellen und dem starren Modell (Abb. 6). Die Unterschiede sind erst bei der Winkelgeschwindigkeit $u_1(t)$ (Ableitung des Drehwinkels) und noch mehr bei der Winkelbeschleunigung $a_1(t)$ (Ableitung der Winkelgeschwindigkeit) deutlich zu erkennen. Über die "ruhigen" Verläufe der Bewegungsgrößen des starren Modells P3R sind bei den elastischen Modellen P7E und P2E "elastische" Schwankungen überlagert. Die Schwingungen werden durch die raschen Anstiege der Ankerspannungen (bzw. der Ankerströme) (Abb. 5) die als "weiche Stöße" wirken, angeregt. Danach klingen diese Schwingungen, nach der Ankerspannungs- bzw. Ankerstromstabilisierung, langsam ab.

Hier ist zu betonen, daß das Robotermodell P7E mit sieben elastischen Elementen grundsätzlich sieben Eigenfrequenzen besitzt, während das Modell P2E mit zwei elastischen Elementen nur zwei Eigenfrequenzen aufweist.

Wegen der starken Kopplungen aller Freiheitsgrade des Robotersystems sind in den drei "starren" Freiheitsgraden jeweils verschieden erregte Eigenschwingungen zu spüren. In Bild 7 merkt man z.B. beim Modell P7E (Linie ---) während der kurzen Phase des Strom- bzw. Antriebsmomentenanstieges eine Schwingung der Winkelbeschleunigung $a_1(t)$ mit einer Schwingungsfrequenz von ca. 11 Hz. Während der weiteren Phase des Stromabfalles dominiert die Schwingung mit einer Frequenz von ca. 40 Hz. Die letztere Schwingungsfrequenz entspricht der des elastischen Freiheitsgrades h_2 (Bild 11). Das heißt, die "lokale" Eigenfrequenz des Freiheitsgrades h_2 ist im "starren" Freiheitsgrad q_1 derselben (horizontalen) Ebene und nicht im "starren" Freiheitsgrad q_2 des entsprechenden Gliedes spürbar (Bild 10), der aber in einer dazu normalen Ebene läuft. Daß diese Schwingung von a_1 , mit der Frequenz 40 Hz im Modell P7E durch den elastischen Freiheitsgrad h_2 induziert wird, zeigt auch der Verlauf von $a_1(t)$ des Modells P2E (Linie -- in Abb. 6), bei welchem diese Schwingung in der zweiten Phase überhaupt nicht erscheint. Die Induzierung dieser Schwingung in horizontaler Ebene vom Gelenk 2 zum Glied 1 erfolgt über das Antriebsmoment $T_{a1}(t)$ (Abb. 6) (bzw. Ankerstrom $I_{a1}(t)$, Abb. 5), das als einziges ein in der horizontalen Ebene wirkendes Antriebsmoment ist. Das vereinfachte Robotermodell P2E besitzt nicht den elastischen Freiheitsgrad h_2 , deshalb spürt sein Antriebsmoment $T_{a1}(t)$ (Linie -- in Abb. 6) nicht diese Schwingung mit der Frequenz 40 Hz. Das bedeutet, man kann durch Regelung über den Ankerstrom $I_{a1}(t)$ mit dem Modell P2E diese Schwingung nicht ausgleichen. Außerdem verspürt die Winkelgeschwindigkeit $u_1(t)$ bzw. die Winkelbeschleunigung $a_1(t)$ beim Modell P2E (Linie -- in Abb. 6) in der ersten Phase eine Schwingung mit einer Frequenz von ca. 64 Hz, also 1.8 mal niedriger als die entsprechende Schwingungsfrequenz beim Modell P7E. Dieser Frequenzunterschied kommt zustande, weil das elastische Element ${}^2s_1^H$ des Modells P2E alle reduzierten Elastizitäten in horizontaler Ebene erfaßt, d.h. dieses Element ist weicher als die entsprechenden (realistischeren) Elemente (s_1^H und s_2^H) des Modells P7E.

Das gleiche gilt auch für die weiteren "starren" Freiheitsgrade $q_2(t)$ und $q_3(t)$ (Abb. 7 bzw. 8). Beide elastische Modelle P7E und P2E weisen elastische Schwankungen ihrer Bewegungsgrößen gegenüber den entsprechenden Verläufen beim starren Modell P3R auf.

Die Schwingungswinkel (die elastischen Freiheitsgrade) und deren Ableitungen nach der Zeit (die Schwingungsgeschwindigkeiten) beider elastischen Modelle sind in den Abbildungen 9 bis 12 dargestellt. Man beachte ihre um einige Zehnerpotenzen kleineren Werte im Vergleich zu den entsprechenden Werten der "starren" Freiheitsgrade. Nochmals wird erwähnt, daß man mit dem vereinfachten Modell P2E nur zwei "elastische"

Freiheitsgrade, d.h. Schwingungswinkel $h_1(t)$ und $v_2(t)$ (Linie - - in Abb. 9 bzw. 10), erfassen kann. Da die elastischen Elemente ${}^2s_1^H$ und ${}^2s_2^V$ des Modells P2E alle elastischen Eigenschaften des Roboters vom Last- bzw. Werkzeugmittelpunkt zur jeweiligen Drehachse beinhalten (um die Bewegung des Werkzeugmittelpunktes möglichst genau zu simulieren), haben die Schwingungswinkel $h_1(t)$ bzw. $v_2(t)$ und die Schwingungsgeschwindigkeiten $u_{h_1}(t)$ bzw. $u_{v_2}(t)$ höhere Spitzenwerte und niedrigere Frequenzen als die entsprechenden (realistischeren) Bewegungsgrößen des vollständigeren Modells P7E.

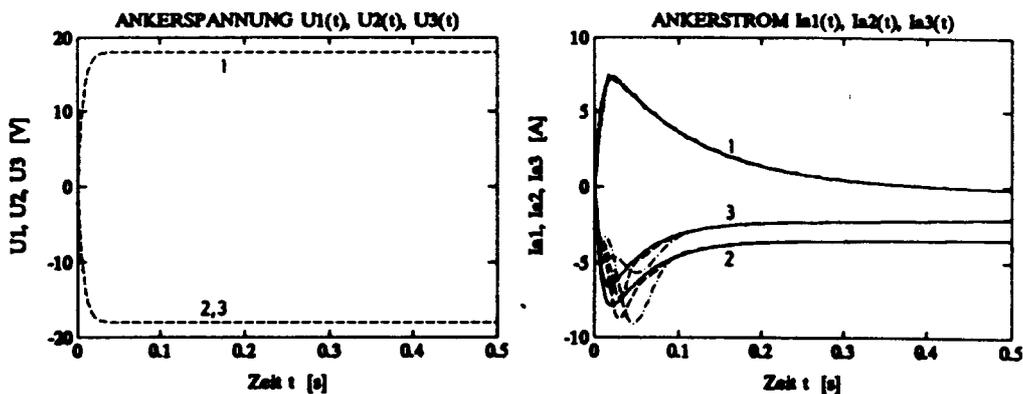


Abb. 5 Ankerspannungen und -ströme der Antriebsmotoren

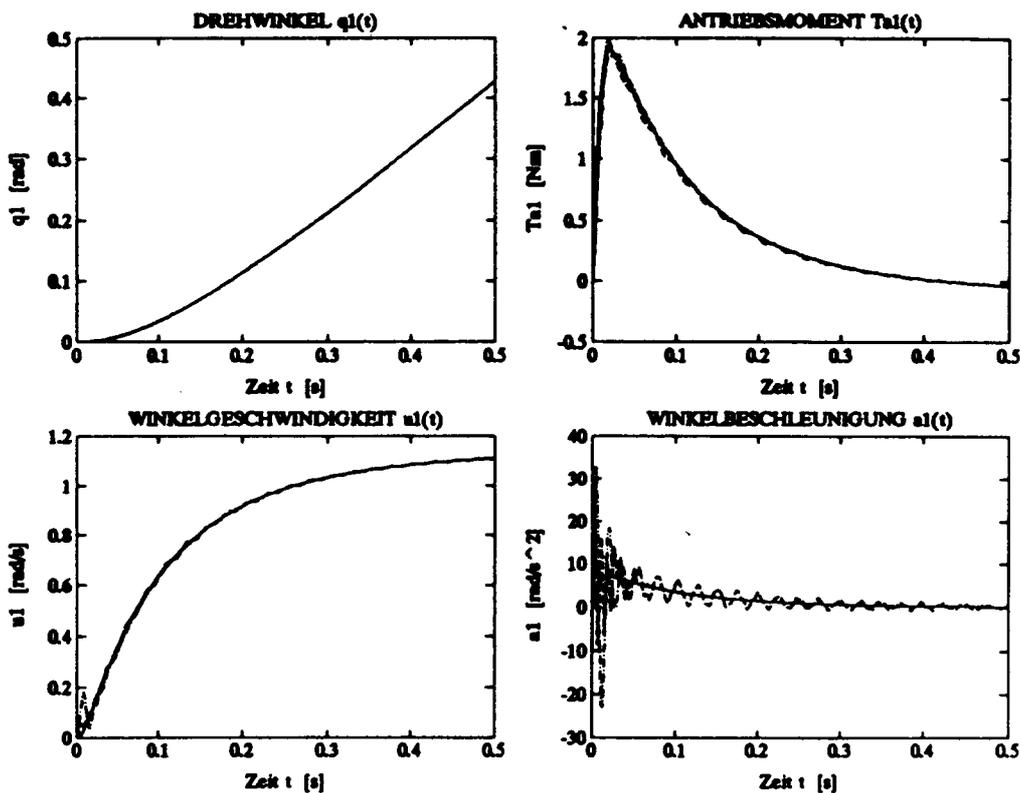


Abb. 6 Bewegungsgrößen des ersten "starrten" Freiheitsgrades

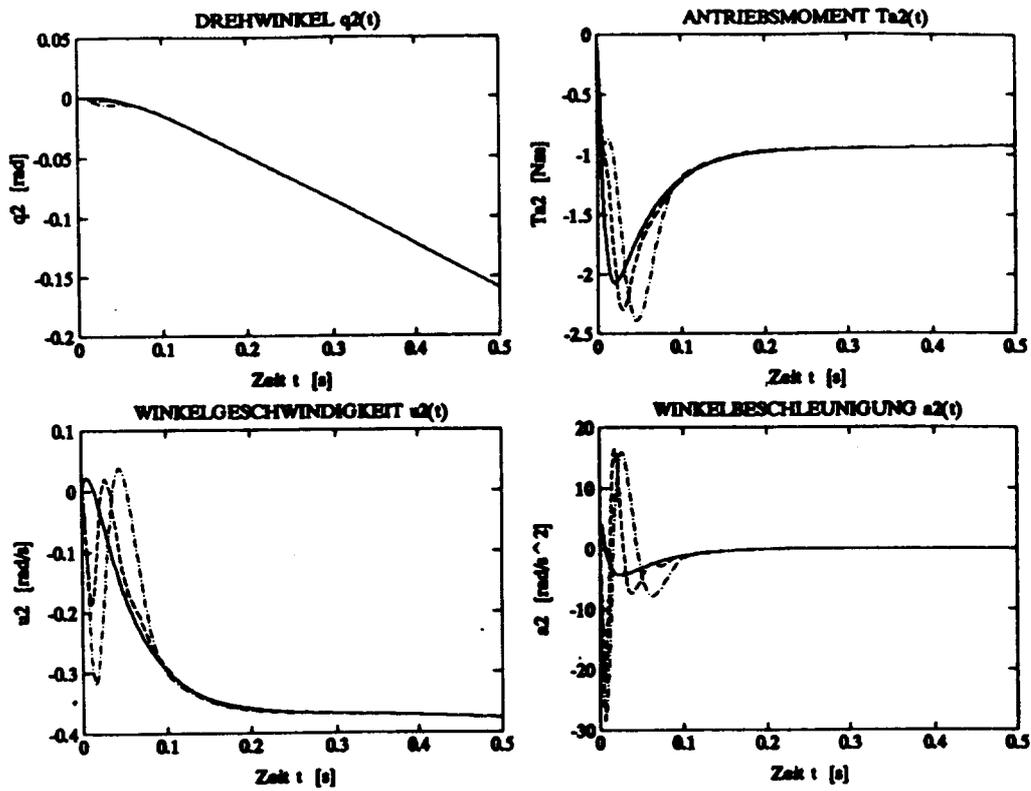


Abb. 7 Bewegungsgrößen des zweiten "starren" Freiheitsgrades

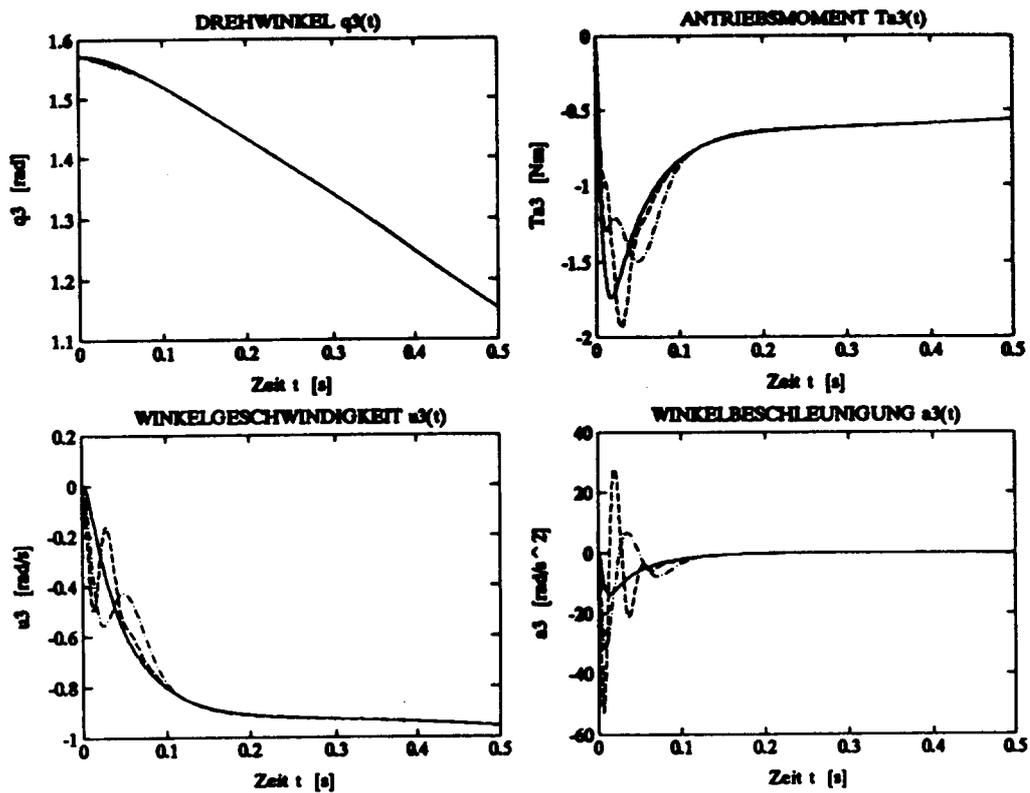
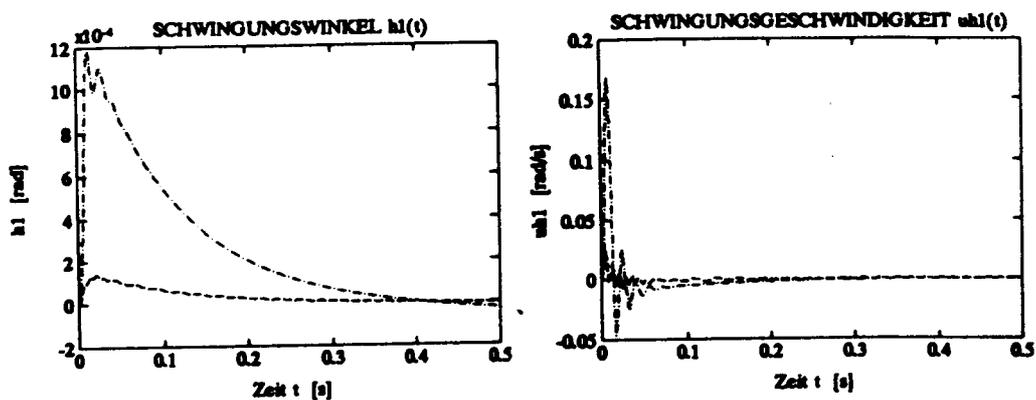
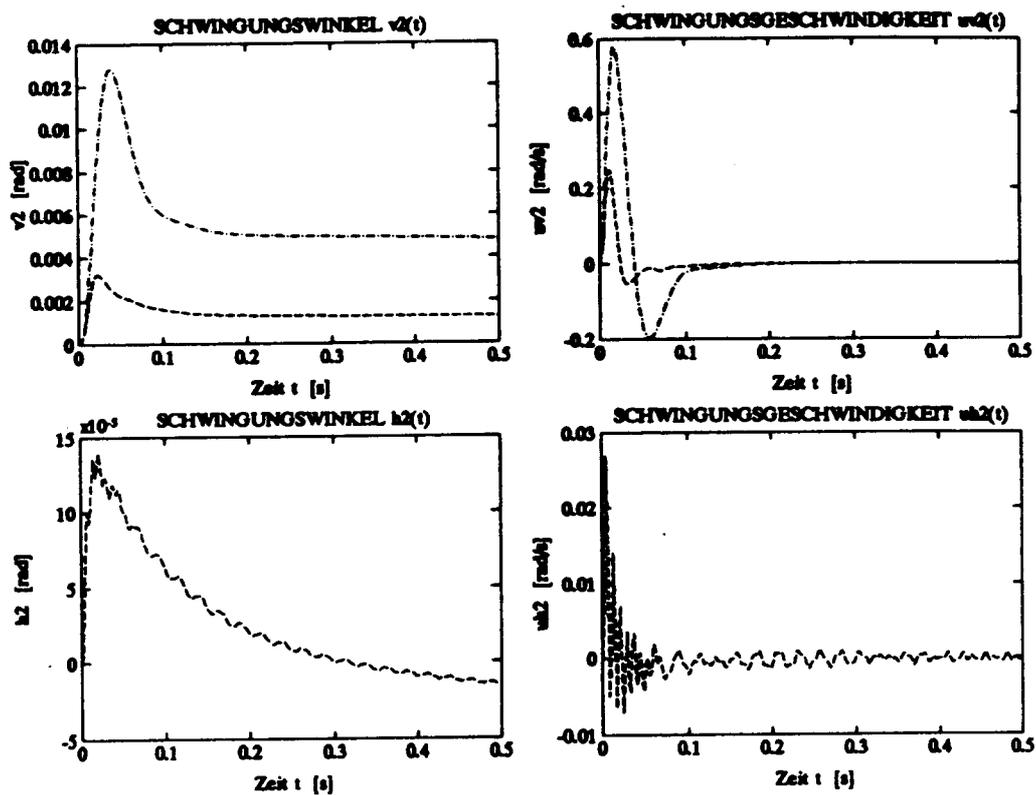


Abb. 8 Bewegungsgrößen des dritten "starren" Freiheitsgrades

Die Gliederelastizitäten sind vielfach niedriger als die Gelenkelastizitäten. Daraus folgt, daß die Schwingungen zufolge der Gliederelastizitäten vielfach niedrigere Spitzenwerte (Amplituden) und höhere Frequenzen als zufolge der Gelenkelastizitäten aufweisen. Man merkt z.B. den Unterschied zwischen dem Spitzenwert von $v_3(t)$ ($\approx 6.6 \times 10^{-3}$ rad) und dem von $v_4(t)$ ($\approx 8.5 \times 10^{-7}$ rad). Der Freiheitsgrad $v_4(t)$ im Modell P7E ist nur zufolge der Elastizität des dritten Gliedes, während der Freiheitsgrad $v_3(t)$ zufolge der Elastizität des zweiten Gliedes und des dritten Gelenkes vorhanden ist. Daraus kann man zu der Schlußfolgerung kommen, daß bei solchen starren Industrierobotern wie PUMA 560, die Gliederelastizitäten vernachlässigt werden können.

Bei den Winkeln $h_3(t)$ und $h_4(t)$ merkt man Schwingungen mit einer Frequenz, die der Schwingungsfrequenz von $h_2(t)$ entspricht. Diese Schwingungen werden bei den Freiheitsgraden $h_3(t)$ und $h_4(t)$ durch das gemeinsame, einzig in horizontaler Ebene wirkende Antriebsmoment $T_{a1}(t)$ (Abb. 5) hervorgerufen.

Für den Entwurf eines schwingungsausgleichenden Reglers wären die relativen Bewegungsgrößen zwischen den starren Gliedern, d.h. die Summen der entsprechenden "starrten" und "elastischen" Bewegungsgrößen von Interesse (Abb. 13, 14 und 15). Bei diesen zusammengefaßten Bewegungsgrößen überwiegen die Schwingungen der "starrten" Freiheitsgrade ($q_1(t)$, $u_1(t)$, $a_1(t)$, $q_2(t)$, ...), die über die jeweiligen Ankerströme $I_{a1}(t)$, $I_{a2}(t)$ und $I_{a3}(t)$ induziert werden. Der Einschwingvorgang der Bewegungsgröße $a_2 + av_2$ (Abb. 14) verläuft beim Modell P2E mit niedrigerer Frequenz als beim Modell P7E. Das ist wieder mit dem niedrigeren Wert der Steifigkeit ${}^2s_2^V$ des Modells P2E im Vergleich mit s_2^V des Modells P7E zu erklären, weil ${}^2s_2^V$ alle reduzierten Steifigkeiten des Roboters in vertikaler Ebene vertritt. Beim Modell P7E mit drei elastischen Elementen in der vertikalen Ebene, sind bei den Winkelbeschleunigungen $a_2 + av_2$ und $a_3 + av_3$ (Abb. 14 bzw. 15) während der zweiten Phase des Stromabfalles (dessen Absolutwertes) leichte, überlagerte Schwingungen zu merken, welche überwiegend die Frequenz von ca. 40 Hz aufweisen. Diese Schwingungen sind mit dem vereinfachten Modell P2E nicht zu erfassen. Daher kann man einen Ausgleich dieser Schwingungen durch eine Regelung des Ankerstromes $I_{a2}(t)$ mit dem Modell P2E nicht erreichen, weil in der ersten Phase eine niedrigere Schwingungsfrequenz der Bewegungsgrößen des zweiten Gliedes sich ergibt und in der zweiten Phase die induzierten Schwingungen überhaupt nicht zu erfassen sind.

Abb. 9 Bewegungsgrößen des ersten "elastischen" Freiheitsgrades h_1 Abb. 10 Bewegungsgrößen der "elastischen" Freiheitsgraden v_2 und h_2

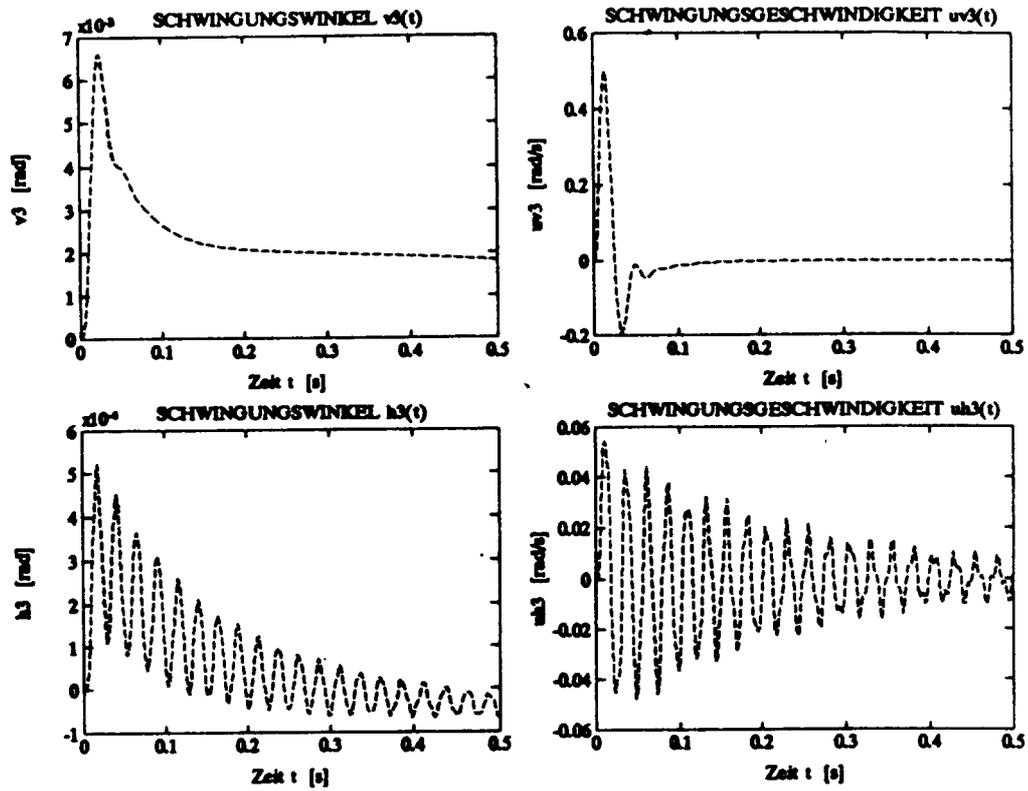


Abb. 11 Bewegungsgrößen der "elastischen" Freiheitsgrade v_3 und h_3

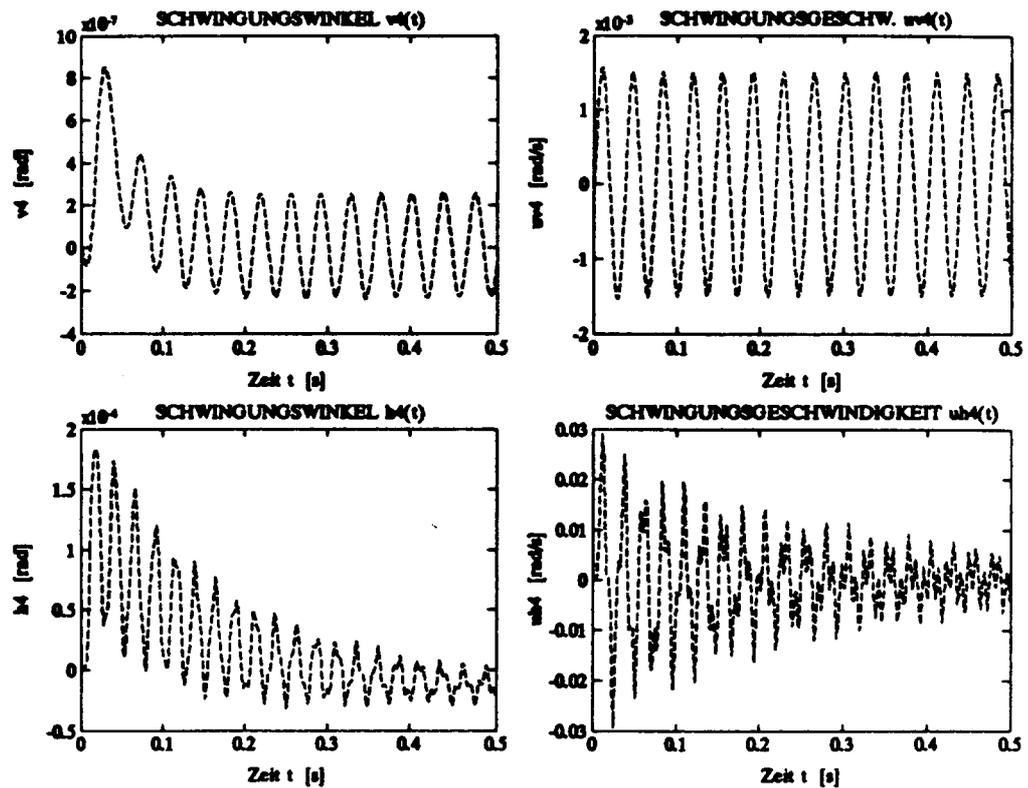


Abb. 12 Bewegungsgrößen der "elastischen" Freiheitsgrade v_4 und h_4

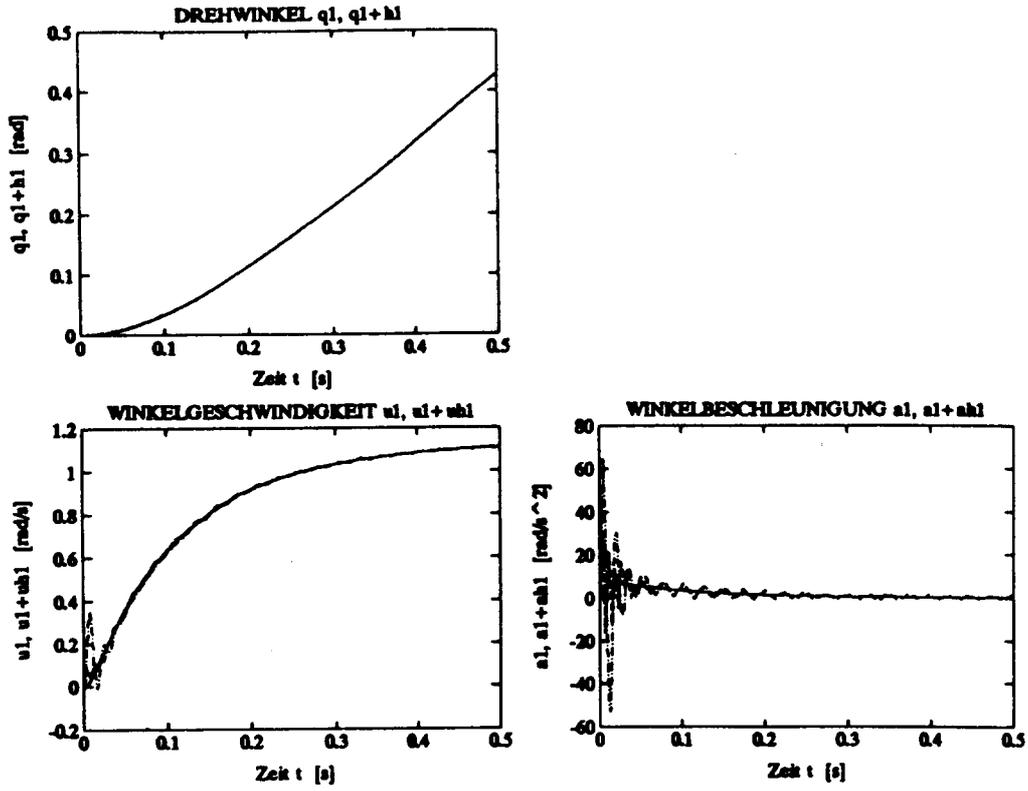


Abb. 13 Bewegungsgrößen des ersten Gliedes

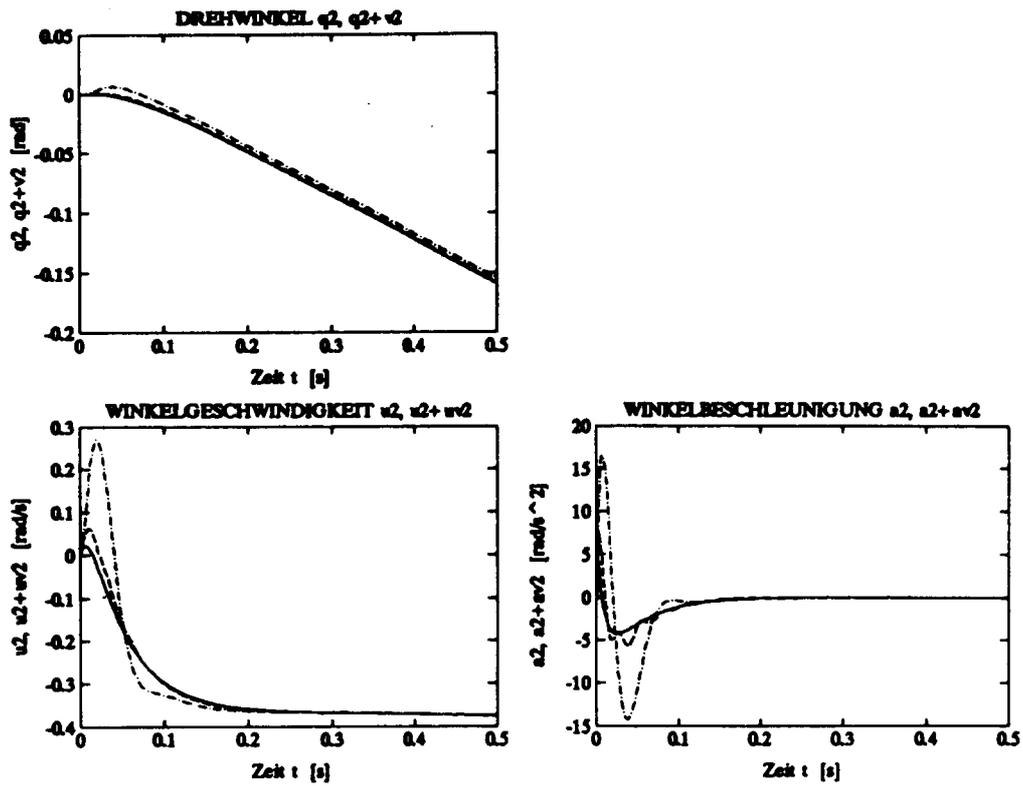


Abb. 14 Bewegungsgrößen des zweiten Gliedes

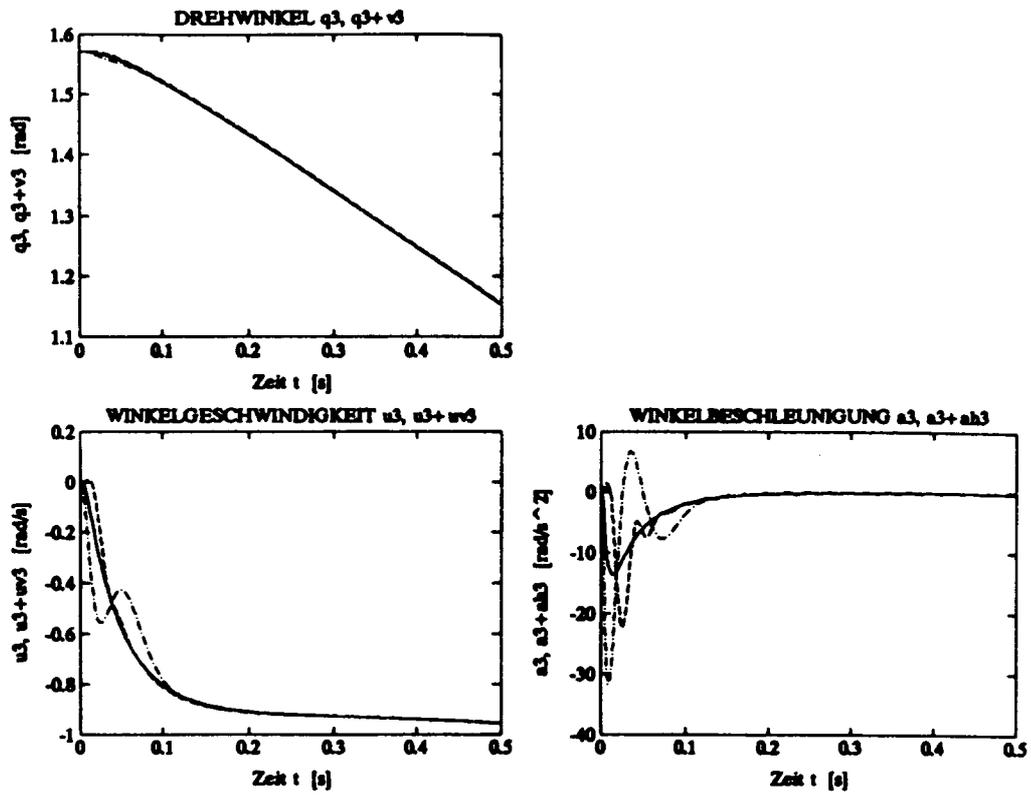


Abb. 15 Bewegungsgrößen des dritten Gliedes

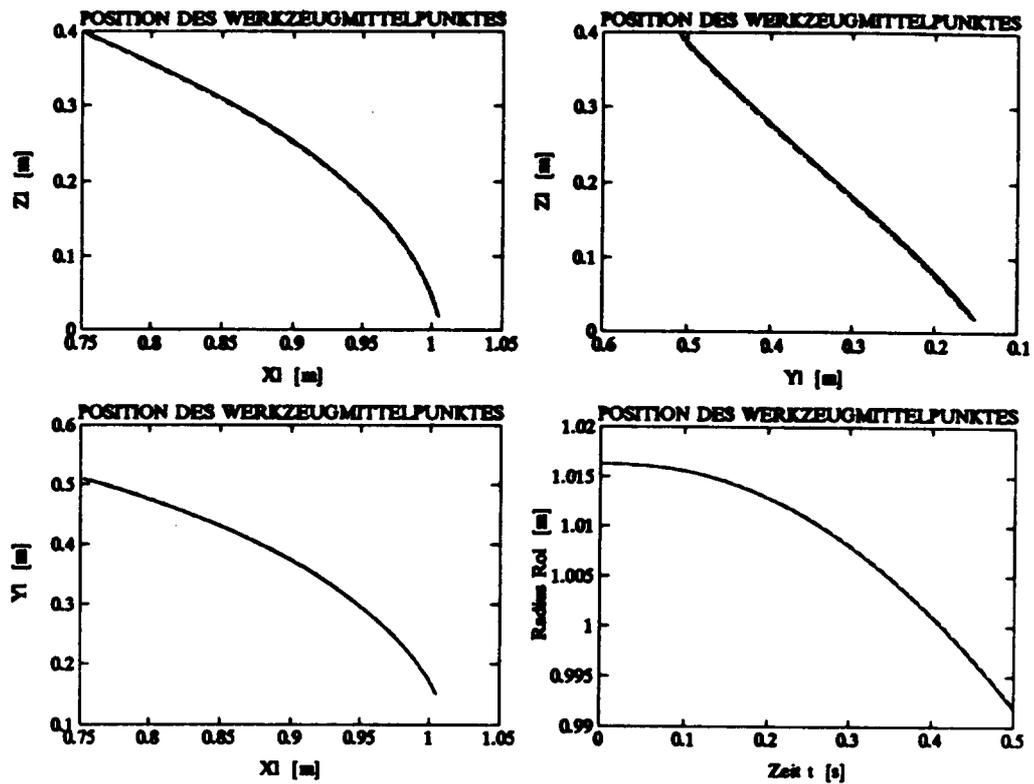


Abb. 16 Bewegung des Werkzeugmittelpunktes

Wegen der hohen Steifigkeiten des PUMA 560 Roboters ergeben sich nur kleine Abweichungen der Bewegung des Werkzeugmittelpunktes bei den elastischen Modellen gegenüber der beim starren Modell (Abb. 16). Die geradlinige Bewegung des Werkzeug- bzw. Lastmittelpunktes beim starren Modell P3R beträgt 0.4435 m, beim Modell P7E 0.4418 m und beim Modell P2E 0.4400 m. Diese Abweichungen der Endposition des Lastmittelpunktes von -1.7 mm (-0.38%) beim Modell P7E und -3.5 mm (-0.78%) beim Modell P2E gegenüber der beim starren Modell P3R sind mit den Verlusten der Motorleistungen zur Deckung der parasitären Schwingungen (obwohl bei den elastischen Modellen jeweils mehr Spitzenleistung und Energie von den Motoren aufgebracht wird) und nicht mit den Schwingungen des Lastmittelpunktes zu erklären.

Wichtig sei hier zu betonen, daß die Frequenzen der betrachteten Bewegungsgrößen, beim gleichzeitigen Antrieb aller drei ersten Motoren, nicht konstant sind. Das kommt daher zustande, weil sich die Massenträgheitsmomente des modellierten 'Torsions-schwingungssystems' mit der Änderung der Abstände der Massenmittelpunkte der Glieder von den jeweiligen Drehachsen ändern. (Fast) konstant wären diese Massenträgheitsmomente z.B. während dem Antrieb eines einzigen Motors.

2.2 Auswirkungen der Massen- und Steifigkeitsreduktionen auf die Roboterdynamik

Die Umkonstruktion eines Roboters mit Reduktionen der Trägheitsparameter (Masse und Massenträgheitsmomente) der Glieder ist im allgemeinen auch mit Reduktionen der Steifigkeiten der Glieder und Gelenke begleitet. Eine Untersuchung der vollständigen Auswirkungen dieser gleichzeitigen Reduktion ist nun mit Hilfe des elastischen Modells P7E möglich. Wie im Abschnitt 1.1 gezeigt wurde, sind im Falle einer 30%-igen Reduktion der Trägheitsparameter aller Roboterglieder die Federkennzahlen des elastischen Modells P7E aus den entsprechenden reduzierten Gliedersteifigkeiten und den um 30% reduzierten Gelenksteifigkeiten berechnet worden (siehe Tab. 4). Beim zweiten Fall der 40%-igen Massenreduktion nur des 2., 3. und 4. Gliedes sind die Federkennzahlen aus den entsprechenden reduzierten Gliedersteifigkeiten und den um 40% reduzierten Steifigkeiten des nur 2. und 3. Gelenkes berechnet worden.

In den folgenden Abbildungen 17 bis 21 bedeuten:

- (A) — Modell P7E mit ursprünglichen Trägheits- und Steifigkeitsparametern
- (B) --- Modell P7E mit -30% aller Trägheits- und Steifigkeitsparameter der Glieder und Gelenke

- (C) -- Modell P7E mit -40% der Trägheits- und Steifigkeitsparameter der Glieder 2, 3 und 4 und -40% der Steifigkeitsparameter der Gelenke 2 und 3.

Die "starrten" und "elastischen" Bewegungsparameter um alle drei Drehachsen bekommen im allgemeinen bei den Modellen B (---) und C (-~) mit reduzierten Trägheits- und Steifigkeitsparametern höhere Absolutwerte als die des ursprünglichen Modells A (—), obwohl bei niedrigeren Antriebsmomenten. Aber die schnelleren und höheren Anstiege der Antriebsmomente $T_{a_i}(t)$ ($i=1, 2, 3$) beim ursprünglichen Modell A (—) verursachen nur in der ersten Phase des Stromanstieges höhere Spitzenbeschleunigungen als bei den massen- und steifigkeitsreduzierten Modellen B (---) und C (-~) (Abb. 17, 18 und 19). Es sei hier zu merken, daß die maximalen Spitzenwerte der Winkelbeschleunigungen $a_1(t)$ (bzw. $a_1 + ah_1$), $a_2(t)$ (bzw. $a_2 + av_2$) und a_3 (bzw. $a_3 + av_3$) nur mittels des elastischen Modells (möglichst) genau zu bewerten sind, weil man mit dem starren Modell P3R um einige Male niedrigere Spitzenwerte als mit dem elastischen Modell P7E bekommt (siehe Abb. 6, 7 und 8). Das ist wichtig bei der Berechnung der Trägheitskräfte- und momente der Glieder und der Last, z.B. für Festigkeitsberechnungen. In der zweiten Phase der Stromstabilisierung werden bei den leichteren Modellen B (---) und C (-~) die Schwingungsamplituden aller Bewegungsparameter größer als beim ursprünglichen Modell A (—). Die Bewegungsparameter in vertikaler ebene $u_2 + uv_2$, $a_2 + av_2$ (Abb. 18) und $u_3 + uv_3$, $a_3 + av_3$ (Abb. 19) bekommen erst bei den erleichterten elastischen Modellen B (---) und C (-~) spürbare Schwankungen während der zweiten Phase. Diese Schwankungen haben die Frequenzen der horizontalen Teilsysteme, welche von ca. 40 Hz beim ursprünglichen Modell A (—) zu ca. 37 Hz beim Modell B (---) und zu ca. 35 Hz beim Modell C (-~) werden.

Der Gesamtschwerpunkt vom Modell B (---) mit einer gleichmäßigen Reduktion der Glieder entfernt sich von der Basis (Abb. 20). Im Gegenteil, der Gesamtschwerpunkt vom Modell C (-~) nähert sich der Basis, was zu günstigen kleineren Biegemomenten an der Basis führt. Das zeigt einen weiteren Vorteil des Modells C mit ausgewählten reduzierten Gliedern.

Für die erleichterten Modelle brauchen die Antriebsmotoren kleinere Antriebsmomente und weniger Leistung aufbringen (Abb. 17, 18, 19 bzw. 21). Am wenigsten Leistung und Energie braucht man zum Antreiben des Modells C (-~) (Abb. 21 und Tab. 6).

Für dieselbe Verschiebung des Lastmittelpunktes mit derselben Lastmasse (4 kg) braucht man beim Modell B (mit -30% Roboter Masse) 80% und beim Modell C (mit -28% Roboter Masse) nur 73% der Antriebsenergie des ursprünglichen Modells A.

Motor	m = 1	2	3	Σ_m
$\Delta E_{cl,m}$ (B)	-23.80	-23.34	-14.89	-20.15
(C)	-29.96	-29.79	-19.69	-26.47

Tab. 6 Auswirkungen der Massen- und Steifigkeitsreduktion auf die benötigte elektrische Energie (Modell P7E) [%]

Diese Energieoptimierung vom Modell C kommt beim Roboter PUMA 560 deutlicher als beim Roboter IGM Limat RT 280-6 zum Ausdruck, weil der Anteil des weniger bewegten ersten Robotergliedes zur Summe der Massenträgheitsmomente um die drei Drehachsen des gestreckten Roboterarmes nur 1.35% beim ersten Roboter und 10% beim zweiten Roboter beträgt. Das heißt, daß die Konstruktion von PUMA 560 von der Verteilung der Massenträgheitsmomente her energiemäßig von vornherein weniger optimiert als die des IGM Limat RT 280-6 ist. Zu diesen Energievergleichen soll also zuerst das Verhältnis der *Massenträgheitsmomente* und nicht das der Massen herangezogen werden. (Das Verhältnis der ersten Gliedmasse zur Gesamtmasse des Roboters beträgt bei PUMA 560 30.6% und bei IGM Limat RT 280-6 32.4%).

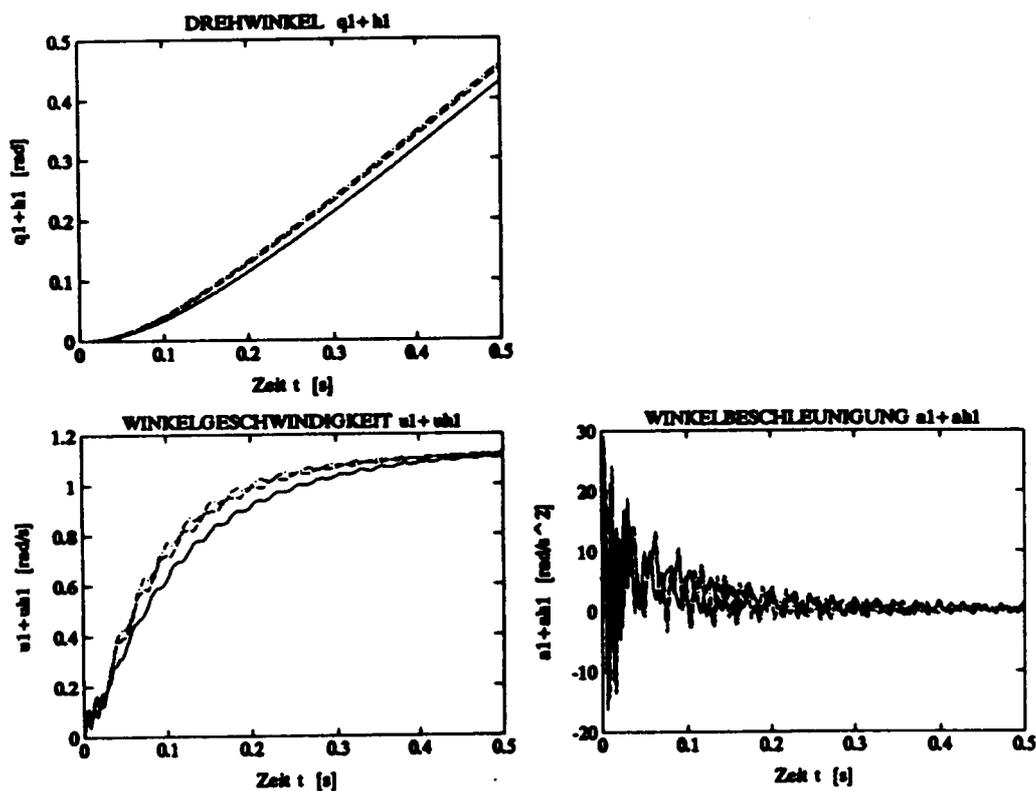


Abb. 17 Gesamtbewegungsgrößen des ersten Gliedes

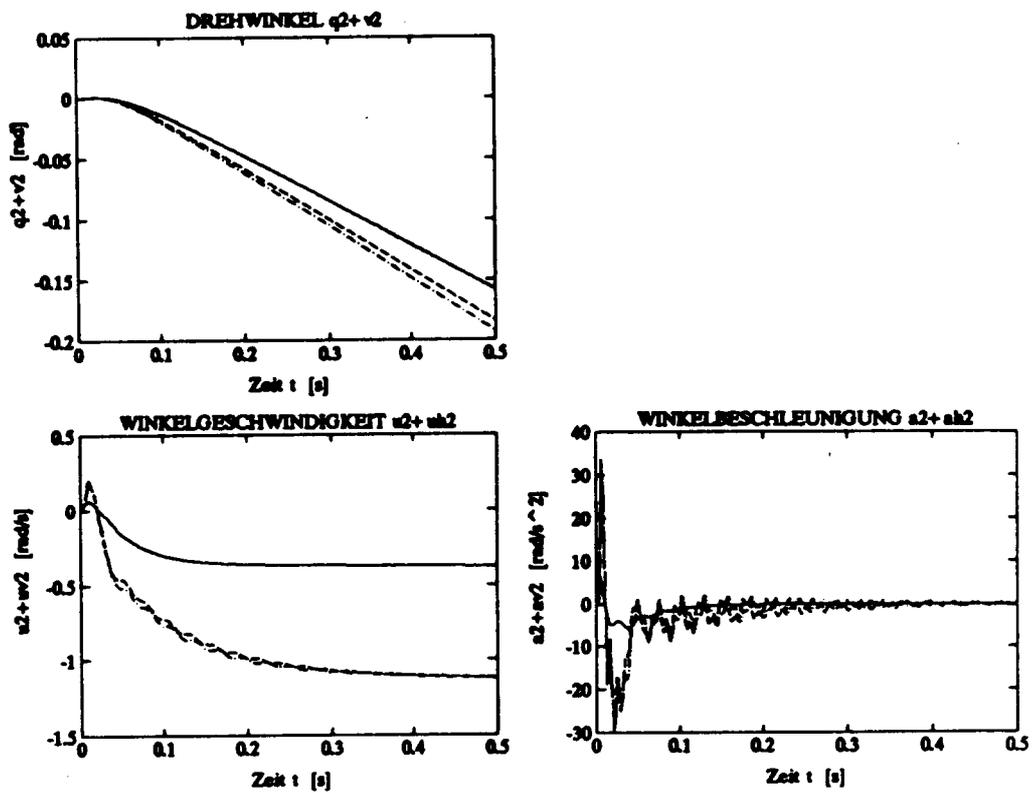


Abb. 18 Gesamtbewegungsgrößen des zweiten Gliedes

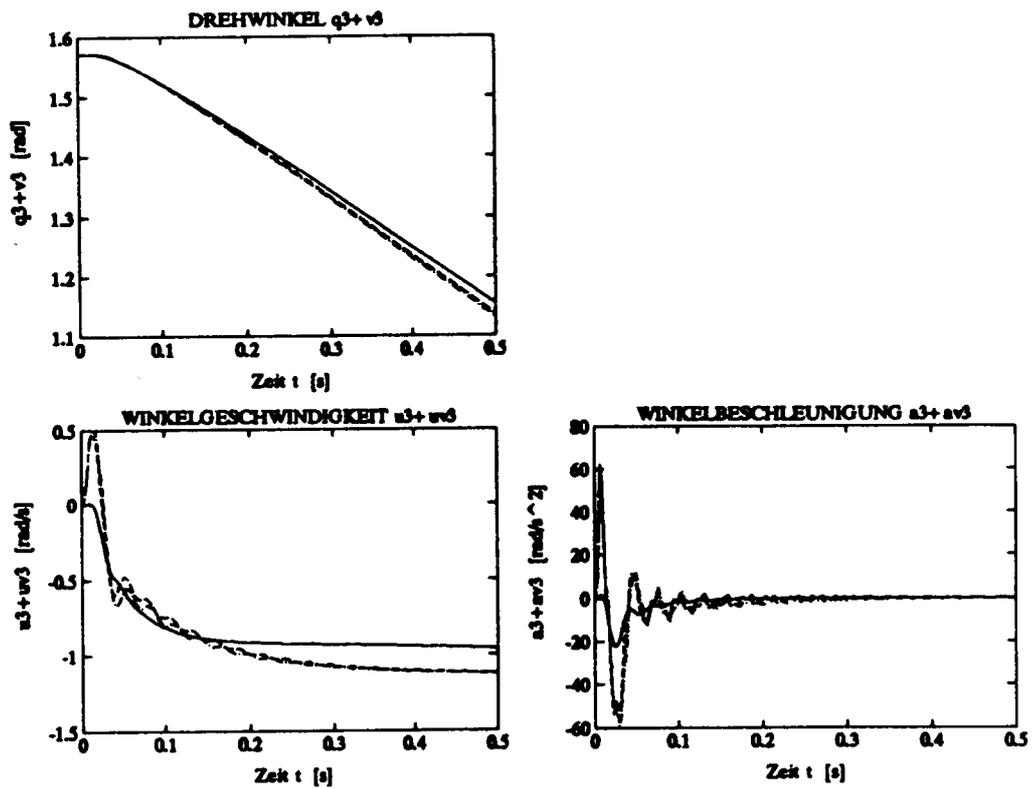


Abb. 19 Gesamtbewegungsgrößen des dritten Gliedes

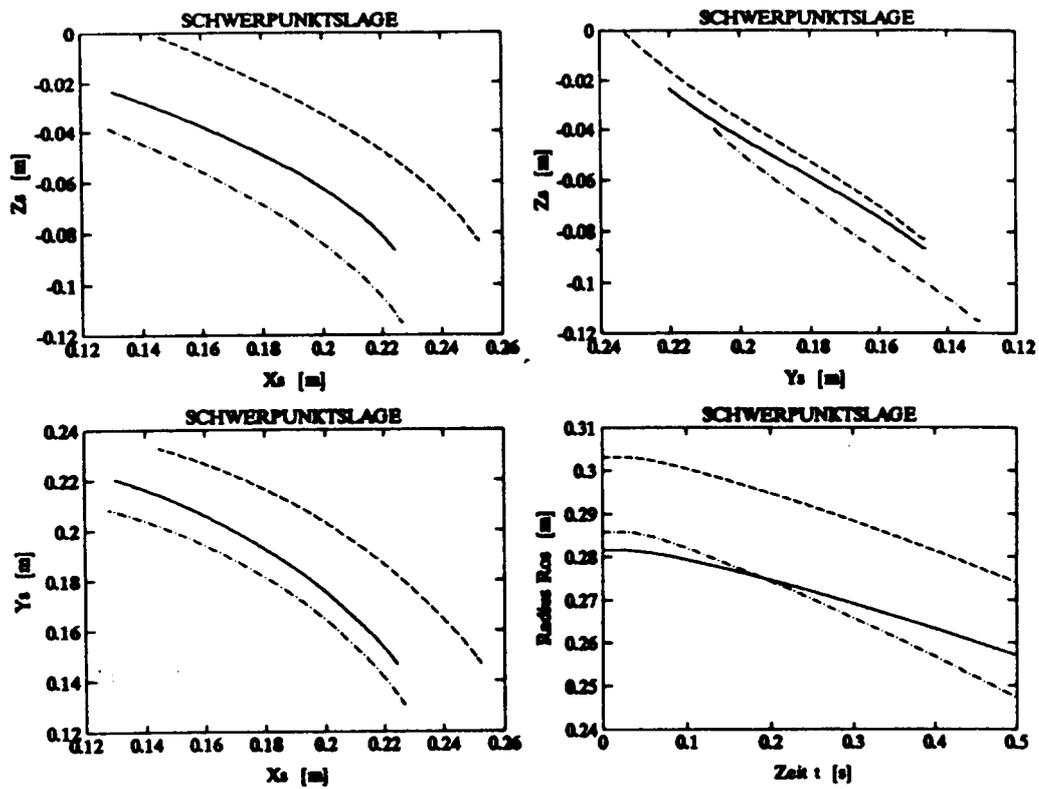


Abb. 20 Bewegung des Roboterschwerpunktes

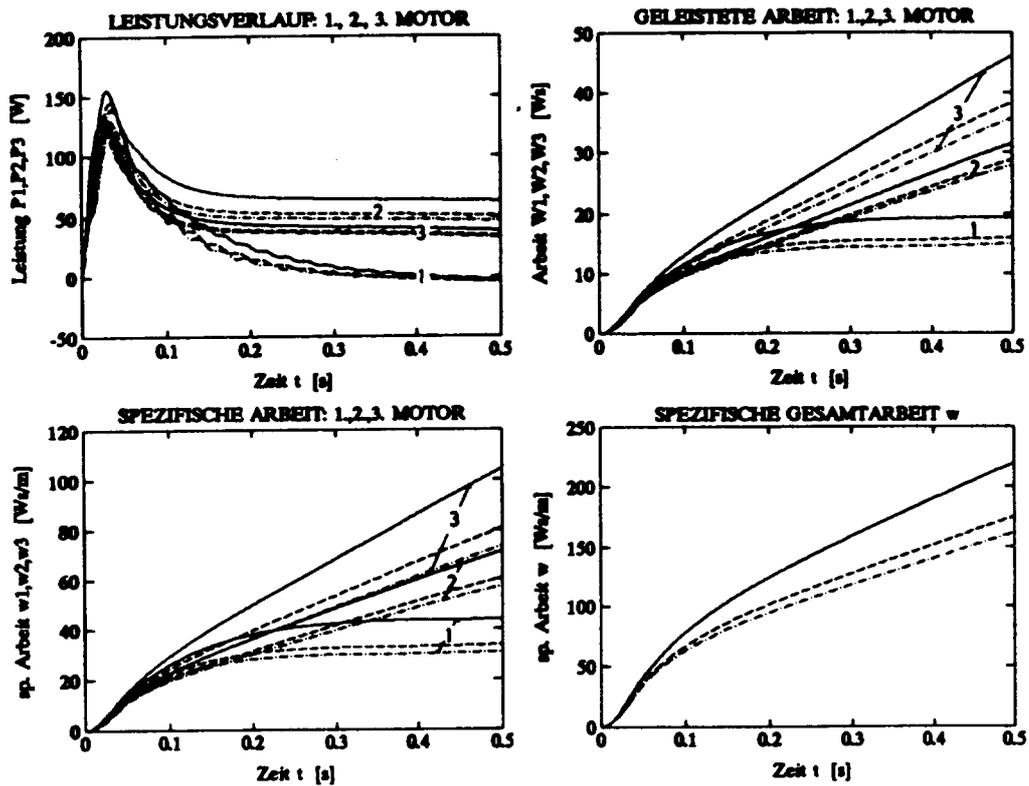


Abb. 21 Leistungsverläufe und geleistete Arbeiten der Antriebsmotoren

Aus der obigen Analyse der mittels Simulation durch ein elastisches Modell gewonnenen Ergebnisse, kommt man zu der Schlußfolgerung, daß eine Energieoptimierung bei (Leichtbau-) Industrierobotern erreicht werden kann, indem man die Trägheitsparameter der Roboterkonstruktion in der Weise gestaltet, daß während der Bewegung mit nominalen Motorspannungen die Verläufe der Bewegungsenergien der Glieder möglichst nahe aneinander liegen.

3. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag zur Thematik Leichtbau-Industrieroboter dar. Als zu untersuchender Roboterexemplar dient der im Labor des Institutes für Handhabungsgeräte und Robotertechnik der TU-Wien vorhandener Industrieroboter PUMA 560, welcher auch die Merkmale der heutigen typischen Industrieroboter mit "massiven" Strukturen verköpert.

Die Modellbildung und Simulation wird mittels eines IBM kompatiblen PC's mit Hilfe des Programmpaketes für Mehrkörperdynamik AUTOLEV durchgeführt, das zur Erstellung der Bewegungsgleichungen vom Verfahren von KANE Gebrauch macht. Die graphische Darstellung der Simulationsergebnisse wird mit dem Programmpaket MATLAB verarbeitet.

Das Robotersystem PUMA 560 wird als elastisches Mehrkörpersystem mit drei "starrten" (der Greiferführungsgetriebe) und mit zwei bzw. sieben "elastischen" FG modelliert. Die elastischen Roboterelemente sind als Torsionsfeder zwischen der Glieder modelliert (bedingt durch das verwendete Programmpaket AUTOLEV). Diese vertreten die Elastizitäten der Antriebssysteme, Robotergelenke und Glieder in zwei Richtungen: parallel und normal zur jeweiligen Drehachse. Die Steifigkeiten der Ersatzfeder werden aus Messungen und Konstruktionsangaben berechnet und auf die jeweiligen Reduktionszentren reduziert.

Zuerst wird der Einfluß der Roboterelastizitäten auf die Bewegungsgrößen analysiert. Wegen der hohen Steifigkeiten treten beim Roboter PUMA 560 Schwingungen mit sehr kleinen Amplituden und hohen Frequenzen auf. Über die ruhigen Verläufe der Bewegungsgrößen des starren Modells P3R (Puma - 3 FG - Rigid) sind bei den elastischen Modellen P7E (mit 7 elastischen Elementen) und P2E (mit 2 elastischen Elementen) "elastische" Schwankungen überlagert. Wegen der starken Kopplungen aller Freiheitsgrade des Robotersystems sind in den drei "starrten" Freiheitsgraden jeweils verschiedene

erregte Eigenschwingungen zu spüren. Man merkt z.B., daß die "lokale" Eigenfrequenz des zweiten horizontalen "elastischen" Freiheitsgrades im ersten "starken" Freiheitsgrad derselben (horizontalen) Ebene und nicht im "starken" Freiheitsgrad des entsprechenden Robotergliedes spürbar ist, der aber in einer dazu normalen Ebene läuft. Die Induzierung dieser Schwingung in horizontaler Ebene vom Glied 2 zum Glied 1 erfolgt über das erste Antriebsmoment, das als einziges ein in der horizontalen Ebene wirkendes Antriebsmoment ist. Diese Schwingungen sind mit dem vereinfachten Modell P2E nicht zu erfassen. Daher kann man einen Ausgleich dieser Schwingungen durch eine Regelung des ersten Ankerstromes mit dem vereinfachten Modell P2E nicht erreichen, weil in der ersten Anlaufphase eine niedrigere Schwingungsfrequenz der Bewegungsgrößen des zweiten Gliedes sich ergibt (wegen seiner niedrigeren Steifigkeit) und in der zweiten Phase die induzierten Schwingungen überhaupt nicht zu erfassen sind.

Die Schwingungen zufolge der Gliederelastizitäten weisen vielfach niedrigere Spitzenwerte (Amplituden) und höhere Frequenzen als zufolge der Gelenkelastizitäten auf. Das kommt zustande, weil die Gliederelastizitäten vielfach niedriger als die Gelenkelastizitäten sind. Daraus kann man zu der Schlußfolgerung kommen, daß bei solchen starren Industrierobotern wie PUMA 560, die Gliederelastizitäten außer Acht gelassen werden können.

Wegen der hohen Steifigkeiten des PUMA 560 Roboters, ergeben sich nur kleine Abweichungen der Bewegung des Werkzeugmittelpunktes bei den elastischen Modellen gegenüber denen beim starren Modell. Diese Abweichungen der Endposition des Werkzeug- bzw. -Lastmittelpunktes von -0.38% beim Modell P7E und -0.78% beim Modell P2E gegenüber der beim starren Modell P3R sind mit den Verlusten der Motorleistungen zur Deckung der parasitären Schwingungen (obwohl bei den elastischen Modellen jeweils mehr Spitzenleistung und Energie von den Motoren aufgebracht wird) und nicht mit den Schwingungen des Lastmittelpunktes zu erklären.

Bei Robotermechanismen ist beachtenswert, daß die Frequenzen der Bewegungsgrößen beim Antrieb aller Motoren nicht konstant sind. Das kommt daher zustande, weil sich die Massenträgheitsmomente dieser als 'Torsionsschwingungssysteme' modellierten Mechanismen mit der Änderung der Abstände der Massenmittelpunkte der Glieder von den jeweiligen Drehachsen ändern.

Die erstrebten Massenreduktionen werden durch Reduktionen der Steifigkeiten der Glieder und Gelenke begleitet. Mit Hilfe des elastischen Modells P7E wird eine Untersuchung der vollständigen Auswirkungen dieser gleichzeitigen Reduktionen möglich. Im

Falle einer 30%-igen Reduktion der Trägheitsparameter aller Roboterglieder werden die Federkennzahlen des elastischen Modells P7E aus den entsprechenden reduzierten Gliedersteifigkeiten und den um 30% reduzierten Gelenksteifigkeiten berechnet. Beim zweiten Fall der 40%-igen Massenreduktion nur des 2., 3. und 4. Gliedes werden die Federkennzahlen aus den entsprechenden reduzierten Gliedersteifigkeiten und den um 40% reduzierten Steifigkeiten des nur 2. und 3. Gelenkes berechnet.

Die Simulationsergebnisse über das elastische Modell P7E zeigen, daß für dieselbe Verschiebung des Lastmittelpunktes, 80% der Antriebsenergie des ursprünglichen Modells beim Modell mit -30% Roboter Masse und nur 73% dieser Antriebsenergie beim Modell mit 40% Massenreduktion des 2., 3. und 4. Gliedes (-28% Roboter Masse) nötig sind.

Energieoptimierung kann bei (Leichtbau-) Industrierobotern erreicht werden, indem man die Trägheitsparameter der Roboterkonstruktion in der Weise gestaltet, daß während der Bewegung mit den nominalen Motorspannungen die Verläufe der Energie ($E_{\text{kin}} + |E_{\text{pot}}|$) der Glieder möglichst nahe aneinander liegen.

Zur Regelung der Industrieroboter sollen die Elastizitäten der mechanischen Konstruktion im Modell eingeschlossen werden. Für die üblichen Industrieroboter mit genügend starren Gliedern soll man die Gelenkelastizitäten (einschließlich die der Antriebseinheiten) mit berücksichtigen, die Gliederelastizitäten kann man vernachlässigen. Bei Leichtrobotern haben die letzteren beachtenswerte Auswirkungen.

Die Anzahl der "elastischen" Freiheitsgrade eines für die Regelung benötigten Robotermodells soll möglichst der Anzahl der elastischen Hauptbewegungen (niederfrequenten Schwingungen) entsprechen, unabhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Steuergrößen (Anzahl der Antriebseinheiten). Zusammen mit den Elastizitäten in die Dreh(Schub)richtungen sollen auch die Elastizitäten in die zur Dreh- und Längsachse der Glieder normalen Richtungen mit berücksichtigt werden. Das gilt für die Gelenkelastizitäten bei starren Robotern und außerdem auch für die Gliederelastizitäten bei Leichtrobotern. Die Elastizitäten in die Längsrichtungen (und meistens auch die in die Torsionsrichtungen) kann man vernachlässigen. Die Wirkung der zu Drehachsen normalen "Nebenelastizitäten" kann als "Störgröße" bei den Motorströmen aufgefaßt und geregelt werden.

4. Literaturverzeichnis

- Çausi, I.D. (1991). Investigations on Leightweight Industrial Robots. In: Robot Control 1991 (Syroco '91). Selected papers from the 3rd IFAC/IFIP/IMACS Symposium, Vienna, Austria, 16-18 Sept. 1991. Pergamon Press, Oxford New-York Seoul Tokyo, 537-541.
- Çausi, I. (1993). Dynamische Einflüsse von Massen- und Steifigkeitsreduktionen auf die Bewegungsgrößen starrer und elastischer Industrieroboter. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 18 Nr. 120, VDI Verlag, Düsseldorf.
- Desoyer, K., Kopacek, P., Troch, I. (1985). Industrieroboter und Handhabungsgeräte. Verlag Oldenbourg, München.
- Hütte (1989). Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Herausgegeben von Horst Czichos. Springer Verlag, Berlin.
- Kane, T.R., Levinson, D.A. (1983). The use of Kane's Dynamical Equations in Robotics. The International Journal of Robotics Research Bd. 2 Nr. 3, 79-90.
- Lugner, P., Desoyer, K., Springer, H., Mittermayr, P. (1986). The Puma 560-robot and Dynamic Effects of Rotating Internal Components in Moving Links. Accepted for publication on a special issue of the MIT Robotics Research Journal, 1-10.
- Rivin, E.I. (1988). Mechanical Design of Robots. McGraw-Hill Book Company, New-York.
- Schaechter, D.B., Levinson D.A., Kane, T.R. (1988). Autolev User's Manual., Sunnyvale: OnLine Dynamics Inc.
- Tarn, T.J., Bejczy, A.K., Han, S., Yun, X. (1985). Inertia Parameters of Puma 560 Robot Arm. Robotics Laboratory Report. SSM-RL-85-01 Washington University, 1-12.
- Whitney, D.E., Lozinski, C.A., Rourke, I.M. (1984). Industrial Robot Calibration Method and Results. Proceedings on Conference on Computers in Engineering, Las Vegas, 31-39.

Time-Domain Identification in the Face of Unknown Initial Conditions

Alexander Weinmann, ÖVE, Senior Member IEEE

Manuscript submitted on August 6, 1994

Summary

The paper is intended for the identification problem directly aiming at the poles of a linear time-invariant system. The calculations are based on the measured output of the system forced by a predetermined input and starting from unknown initial conditions; unknown and arbitrary but fixed. In detail, the identification method is evaluated for incremental changes in the poles of the system.

1 Introduction

The identification problem for linear time-invariant dynamical systems can be solved via numerous approaches based on the linear regression and applied to the coefficients of the differential equation, using either ordinary least squares (*Eyckhoff, P., 1974; Ljung, L., 1987*) or total or model least squares (*Weinmann, A., 1994a*).

This paper presents an alternative issue based on the poles of the transfer function, i.e., the zeros of the characteristic polynomial associated with the differential equation, by evaluating an output of the system in time domain. The transfer function of the system is assumed free of zeros and characterized by distinct real poles, for simplification purposes. However, the initial conditions are assumed non-zero, unknown but fixed.

An identification algorithm is designed which tolerates the unknown initial conditions and which provides the eigenvalues of the system.

The output $X_a(s) = \mathcal{L}\{x_a(t)\}$ of the n th order dynamical system with transfer function $G(s)$, input $X_e(s) = \mathcal{L}\{x_e(t)\}$ and initial conditions $\mathbf{x}_a(0^-)$ is given by

$$X_a(s) = G(s)X_e(s) + \frac{1}{\sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i s^i} \mathbf{x}_a^T(0^-) \mathbf{A}_D \mathbf{s} \quad (1)$$

where the meaning of the boldface symbols is

$$\mathbf{x}_a(t) \triangleq \begin{pmatrix} x_a(t) & \dot{x}_a(t) & \ddot{x}_a(t) & \dots & x_a^{(n-1)}(t) \end{pmatrix}^T \quad \mathbf{s} \triangleq (s^0 \ s^1 \ s^2 \ \dots \ s^{n-1})^T \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_D \triangleq \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \dots & \alpha_n \\ \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 & \dots & \alpha_n & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 \\ \alpha_{n-1} & \alpha_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \text{matrix}[A_{Dij}] = \text{matrix}[\alpha_{i+j-1}] \quad \forall \alpha_\mu = 0 \quad \mu > n \quad (3)$$

and, moreover,

$$G(s) = \frac{V}{\sum_{i=0}^n \alpha_i s^i} . \quad (4)$$

The system is considered excited by $x_e(t)$. Its Laplace transform $X_e(s)$ is characterized by predefined poles. The signal $x_e(t)$ should be sufficiently frequency rich. Referring to Eq.(1), the output $X_a(s)$ is characterized by poles both of $X_e(s)$ and $G(s)$. The number of poles of $X_a(s)$ and $G(s)$ is n_p and n , respectively. The identification result is given by the set difference of the set of poles of $X_a(s)$, i.e., \mathbf{a} , minus the known set of poles of $X_e(s)$.

Combining both terms of the right-hand side of Eq.(1) reveals that the system appears in a situation of pretending Laplace transform zeros. The residues of the inverse Laplace transform depend on $\mathbf{x}_a(0^-)$. However, the poles a_i are not influenced by $\mathbf{x}_a(0^-)$ (see, e.g., *Weinmann, A., 1994, pp. 20-21*).

A parameter \mathbf{p} , see Eq.(6), is influenced by $\mathbf{x}_a(0^-)$ but is not investigated further. Therefore, the initial conditions remain out of consideration.

2 Minimizing the Deviation in L_2

Suppose the system being repeatedly excited by an input $x_e(t)$. The corresponding output is $x_a(t)$ and is assumed recorded. Find an optimum approximation of $x_a(t)$ in L_2 , using a parameter vector \mathbf{p} weighting the components of a vector $\mathbf{h}(t)$ of exponential functions $e^{a_i t} \quad \forall i = 1, 2 \dots n_p$, i.e.,

$$\mathbf{h}(t) \triangleq \begin{pmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \\ \vdots \end{pmatrix} \triangleq \text{vec}\{e^{a_i t}\} \in \mathcal{R}^{n_p \times 1} \quad h_i(t) \triangleq e^{a_i t} \quad (5)$$

$$C_2 \triangleq \int_0^{t_f} [x_a(t) - \mathbf{p}^T \mathbf{h}(t)]^2 dt \rightarrow \min_{\mathbf{a}, \mathbf{p}} . \quad (6)$$

The vector \mathbf{a} of unknown poles is $\mathbf{a} \triangleq \text{vec}\{a_i\} \in \mathcal{R}^{n_p \times 1}$. Deriving C_2 with respect to \mathbf{p} and equating with zero yields

$$\mathbf{p} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{y} \quad (7)$$

$$\text{where } \mathbf{N} = \mathbf{N}(\mathbf{a}) \triangleq \int_0^{t_f} \mathbf{h}(t) \mathbf{h}^T(t) dt \equiv \mathbf{N}^T \in \mathcal{R}^{n_p \times n_p} \quad (8)$$

$$\text{and } \mathbf{y} = \mathbf{y}(\mathbf{a}) \triangleq \int_0^{t_f} x_a(t) \mathbf{h}(t) dt \in \mathcal{R}^{n_p \times 1}, \quad (9)$$

see Appendix A.

Derivating with respect to \mathbf{a} , calculating $\frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{a}} = \mathbf{0}$, i.e., combining Eqs.(28) and (32) element by element, the result

$$\boxed{\int_0^{t_f} t x_a(t) e^{a_i t} dt = \mathbf{y}^T \mathbf{N}^{-1} \int_0^{t_f} t e^{a_i t} \mathbf{h}(t) dt \quad \forall i = 1, 2 \dots n_p} \quad (10)$$

is achieved. See Appendix B for details. Eq.(10) is a set of nonlinear equations in the eigenvalues a_i , $\forall i = 1, 2 \dots n_p$ and can only be solved numerically.

3 Incremental Calculations in Vector Form

In Appendices C through F, the components of Eq.(10) are considered for small incremental change in $x_a(t)$ and rewritten in vector form. Terms small of second order are neglected. The right-hand side of Eq.(10) is a scalar, resulting from a vector product. It is transposed before rewriting. Now, with the help of Eq.(48), define

$$\mathbf{Q} \triangleq (\mathbf{q}_1 \vdots \mathbf{q}_2 \vdots \mathbf{q}_3 \vdots \dots) \in \mathcal{R}^{n_p \times n_p}. \quad (11)$$

From Eqs.(10), (33) and (39) and since $\mathbf{N} = \mathbf{N}^T$,

$$\mathbf{d} + \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{a} + \mathbf{d}_\Delta = \mathbf{Q}^T \mathbf{N}^{-1} (\mathbf{y}_o + \mathbf{y}_\Delta + \mathbf{D}_1 \Delta \mathbf{a}). \quad (12)$$

Evolving Eq.(11) by using Eq.(48),

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{q}_{i0} - 2\mathbf{A}_{i0}(\Delta \mathbf{a} + \Delta a_i \mathbf{1}) \quad (13)$$

where

$$\mathbf{q}_{i0} = \begin{pmatrix} \frac{1}{(a_{i0} + a_{10})^2} \\ \frac{1}{(a_{i0} + a_{20})^2} \\ \vdots \\ \frac{1}{(a_{i0} + a_{k0})^2} \\ \vdots \end{pmatrix}, \quad \mathbf{1} \triangleq \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{i0} = \text{diag}_k \left\{ \frac{1}{(a_{i0} + a_{k0})^3} \right\}. \quad (14)$$

Using these definitions and the Kronecker product \otimes , one has

$$\mathbf{Q} = \left(\mathbf{q}_{10} - 2\mathbf{A}_{10}(\Delta \mathbf{a} - \Delta a_1 \mathbf{1}) \vdots \mathbf{q}_{20} - 2\mathbf{A}_{20}(\Delta \mathbf{a} - \Delta a_2 \mathbf{1}) \vdots \dots \right) \quad (15)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_o - \mathbf{A}(\mathbf{I} \otimes \Delta \mathbf{a}) - \mathbf{A} \left[(\text{diag}\{\Delta a_i\}) \otimes \mathbf{1} \right] \quad (16)$$

where

$$\mathbf{Q}_o \triangleq (\mathbf{q}_{10} \vdots \mathbf{q}_{20} \vdots \mathbf{q}_{30} \vdots \dots) \in \mathcal{R}^{n_p \times n_p} \quad (17)$$

$$\mathbf{A} \triangleq 2(\mathbf{A}_{10} : \mathbf{A}_{20} : \mathbf{A}_{30} :) \in \mathcal{R}^{n_p \times n_p^2}. \quad (18)$$

From Eq.(12), utilizing Eq.(16),

$$\begin{aligned} \mathbf{d} + \mathbf{d}_\Delta + \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{a} &= \left[\mathbf{Q}_o^T - (\mathbf{I} \otimes \Delta \mathbf{a})^T \mathbf{A}^T - [(\text{diag}\{\Delta a_i\}) \otimes \mathbf{1}]^T \mathbf{A}^T \right] \times \\ &\quad \times (\mathbf{N}_o^{-1} - \mathbf{N}_o^{-1} \Phi \mathbf{N}_o^{-1})(\mathbf{y}_o + \mathbf{y}_\Delta + \mathbf{D}_1 \Delta \mathbf{a}) \end{aligned} \quad (19)$$

where Φ is given by Eq.(44) of Appendix E. Furthermore, evolving the product of the right-hand side and reducing by neglecting terms small of second order yields

$$\begin{aligned} \mathbf{d} + \mathbf{d}_\Delta + \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{a} &= \mathbf{Q}_o^T \left[\mathbf{N}_o^{-1} \mathbf{y}_o + \mathbf{N}_o^{-1} \mathbf{y}_\Delta + \mathbf{N}_o^{-1} \mathbf{D}_1 \Delta \mathbf{a} - \mathbf{N}_o^{-1} \Phi \mathbf{N}_o^{-1} (\mathbf{y}_o + \mathbf{y}_\Delta) \right] - \\ &\quad - (\mathbf{I} \otimes \Delta \mathbf{a})^T \mathbf{A}^T \mathbf{N}_o^{-1} (\mathbf{y}_o + \mathbf{y}_\Delta) - [(\text{diag}\{\Delta a_i\}) \otimes \mathbf{1}]^T \underbrace{\mathbf{A}^T \mathbf{N}_o^{-1} (\mathbf{y}_o + \mathbf{y}_\Delta)}_{\triangleq \mathbf{1}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Since $\Delta x_a(t) = 0$ entails $\Delta \mathbf{a} = \mathbf{0}$, one has $\mathbf{d} = \mathbf{Q}_o^T \mathbf{N}_o^{-1} \mathbf{y}_o$. Then, by Eq.(49),

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_\Delta + \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{a} &= \mathbf{Q}_o^T \mathbf{N}_o^{-1} \mathbf{y}_\Delta + \mathbf{Q}_o^T \mathbf{N}_o^{-1} \mathbf{D}_1 \Delta \mathbf{a} - \mathbf{Q}_o^T \mathbf{N}_o^{-1} \underbrace{\Phi \mathbf{N}_o^{-1} (\mathbf{y}_o + \mathbf{y}_\Delta)}_{\triangleq \mathbf{k}} - \\ &\quad - (\mathbf{I} \otimes \Delta \mathbf{a}^T) \underbrace{\mathbf{A}^T \mathbf{N}_o^{-1} (\mathbf{y}_o + \mathbf{y}_\Delta)}_{\triangleq \mathbf{c}} - \mathbf{L} \Delta \mathbf{a}. \end{aligned} \quad (21)$$

Using the relation of Eqs.(45) and (50),

$$\mathbf{d}_\Delta + \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{a} = \mathbf{Q}_o^T \mathbf{N}_o^{-1} \mathbf{y}_\Delta + \mathbf{Q}_o^T \mathbf{N}_o^{-1} \mathbf{D}_1 \Delta \mathbf{a} - \mathbf{Q}_o^T \mathbf{N}_o^{-1} \Lambda_k \Delta \mathbf{a} - \mathbf{C} \Delta \mathbf{a} - \mathbf{L} \Delta \mathbf{a} \quad (22)$$

and, eventually,

$$\Delta \mathbf{a} = \left\{ \mathbf{D}_2 - \mathbf{Q}_o^T \mathbf{N}_o^{-1} (\mathbf{D}_1 + \Lambda_k) + \mathbf{C} + \mathbf{L} \right\}^{-1} (\mathbf{Q}_o^T \mathbf{N}_o^{-1} \mathbf{y}_\Delta - \mathbf{d}_\Delta). \quad (23)$$

By Eq.(23), the increment $\Delta \mathbf{a}$ results, providing the L_2 optimal change in the parameter vector caused by the change $\Delta x_a(t)$.

4 Conclusion

The results can be utilized as follows:

- Preassume that the increments $\Delta \mathbf{a}$ are small between succeeding identification steps. Then, the algorithm can be used in order to solve the special problem of identification even subject to predetermined bounds for one or the other pole; disregarding the fact that parameter limitations probably result in worse approximation accuracy.

- Investigating $\text{opt}_{\mathbf{p},\mathbf{a}}C_2$, according to the result of Eq.(23) for a great many of measurements including all system uncertainties, there is the opportunity of system identification including uncertainty. The bounds of \mathbf{a} are extended as long as the relation $\text{opt}_{\mathbf{p},\mathbf{a}}C_2 < C_{2o}$ holds where C_{2o} is a predetermined accuracy limit.

References:

- Eykhoff, P., 1974, System Identification. Parameter and State Estimation (John Wiley and Sons, London New York)*
- Ljung, L., 1987, System Identification: Theory for the User (Prentice-Hall, New York)*
- Weinmann, A., 1994, Regelungen, Analyse und technischer Entwurf, Band 1, 3. Auflage (Springer, Wien)*
- Weinmann, A., 1994a, Convergence Evaluation of Model Least Squares Applications in High-Precision Process Identification, Int. J. Automation Austria 2, pp. 38-54*

Appendices:

A Derivation with Respect to \mathbf{p}

$$C_2 = \int_0^{t_f} [\mathbf{x}_a^2(t) - 2\mathbf{x}_a(t)\mathbf{p}^T\mathbf{h}(t) + \mathbf{p}^T\mathbf{h}(t)\mathbf{h}^T(t)\mathbf{p}]dt \quad (24)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{p}} = -2 \int_0^{t_f} \mathbf{x}_a(t)\mathbf{h}(t)dt + 2 \int_0^{t_f} \mathbf{h}(t)\mathbf{h}^T(t)dt \mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (25)$$

$$\mathbf{p} = [\int_0^{t_f} \mathbf{h}(t)\mathbf{h}^T(t)dt]^{-1} \int_0^{t_f} \mathbf{x}_a(t)\mathbf{h}(t)dt \rightsquigarrow \text{Eq.(7)} . \quad (26)$$

B Derivation with Respect to \mathbf{a}

Deriving the first \mathbf{p} -dependent part of C_2 in Eq.(24) with respect to a_1 ,

$$\frac{\partial}{\partial a_1} \left\{ -2 \int_0^{t_f} \mathbf{x}_a(t) [p_1 h_1(t) + p_2 h_2(t) + \dots] dt \right\} = -2 \int_0^{t_f} \mathbf{x}_a(t) p_1 t e^{a_1 t} dt = -2 p_1 \int_0^{t_f} t \mathbf{x}_a(t) e^{a_1 t} dt, \quad (27)$$

and with respect to \mathbf{a} ,

$$-2 \text{vec}_i \left\{ p_i \int_0^{t_f} t \mathbf{x}_a(t) e^{a_1 t} dt \right\}. \quad (28)$$

Deriving the second \mathbf{p} -dependent part of Eq.(24) with respect to a_1 yields

$$\frac{\partial}{\partial a_1} \int_0^{t_f} \mathbf{p}^T \begin{pmatrix} h_1 h_1 & h_1 h_2 & h_1 h_3 & \dots \\ h_2 h_1 & h_2 h_2 & h_2 h_3 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \mathbf{p} dt = \quad (29)$$

$$= \int_0^{t_f} \mathbf{p}^T \begin{pmatrix} 2t e^{2a_1 t} & t e^{(a_1+a_2)t} & t e^{(a_1+a_3)t} & \dots \\ t e^{(a_1+a_2)t} & 0 & 0 & \dots \\ t e^{(a_1+a_3)t} & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \mathbf{p} dt = \quad (30)$$

$$= \int_0^{t_f} \mathbf{p}^T \begin{pmatrix} 2t p_1 e^{2a_1 t} + p_2 t e^{(a_1+a_2)t} + \dots \\ p_1 t e^{(a_1+a_2)t} \\ p_1 t e^{(a_1+a_3)t} \\ \vdots \end{pmatrix} dt = \dots = 2 p_1 \mathbf{p}^T \int_0^{t_f} t e^{a_1 t} \mathbf{h}(t) dt \quad (31)$$

and, finally,

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{a}} \int_0^{t_f} \mathbf{p}^T \begin{pmatrix} h_1 h_1 & h_1 h_2 & h_1 h_3 & \dots \\ h_2 h_1 & h_2 h_2 & h_2 h_3 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \mathbf{p} dt = 2 \text{vec}_i \left\{ p_i \mathbf{p}^T \int_0^{t_f} t e^{a_1 t} \mathbf{h}(t) dt \right\}. \quad (32)$$

C Increments of the Weighted Output

Evolving the increments of $\int_0^\infty t \mathbf{x}_a(t) e^{a_1 t} dt$ and omitting terms small of second order, in the left-hand side of Eq.(10) one has

$$\int_0^\infty t \mathbf{x}_a(t) e^{a_1 t} dt = \int_0^\infty t [\mathbf{x}_{a_0}(t) + \Delta \mathbf{x}_a(t)] e^{(a_{i_0} + \Delta a_i)t} dt \doteq (\mathbf{d} + \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{a} + \mathbf{d}_\Delta)_i \quad (33)$$

$$\text{where } d_i \triangleq \int_0^\infty t \mathbf{x}_{a_0}(t) e^{a_{i_0} t} dt, \quad \mathbf{d} \triangleq \text{vec}\{d_i\} \quad (34)$$

$$d_{\Delta i} \triangleq \int_0^\infty t \Delta \mathbf{x}_a(t) e^{a_{i_0} t} dt, \quad \mathbf{d}_\Delta \triangleq \text{vec}\{d_{\Delta i}\} \quad (35)$$

$$\mathbf{D}_2 \triangleq \text{diag}\left\{ \int_0^\infty t^2 \mathbf{x}_{a_0}(t) e^{a_{i_0} t} dt \right\} \quad \text{and} \quad \Delta \mathbf{a} \triangleq \text{vec}\{\Delta a_i\}. \quad (36)$$

D Evaluating the Increments in y

$$y = \int_0^{\infty} x_a(t)h(t)dt = \int_0^{\infty} [x_{a_0}(t) + \Delta x_a(t)]\text{vec}_i\{e^{(a_{i_0} + \Delta a_i)t}\}dt = \quad (37)$$

$$= \int_0^{\infty} x_{a_0}(t)\text{vec}_i\{e^{a_{i_0}t}\}dt + \int_0^{\infty} \Delta x_a(t)\text{vec}_i\{e^{a_{i_0}t}\}dt + \text{vec}_i\{\Delta a_i \int_0^{\infty} t x_{a_0}(t)e^{a_{i_0}t}dt\} \triangleq \quad (38)$$

$$y \triangleq y_o + y_{\Delta} + D_1 \Delta a \quad \text{where} \quad D_1 \triangleq \text{diag}_i\left\{\int_0^{\infty} t x_{a_0}(t)e^{a_{i_0}t}dt\right\}. \quad (39)$$

E Extension of N Versus Increments of a

From the definition of Eq.(8),

$$N = \int_0^{t_f} \begin{pmatrix} e^{(a_1+a_1)t} & e^{(a_1+a_2)t} & \dots \\ e^{(a_2+a_1)t} & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \ddots \end{pmatrix} dt, \quad (40)$$

and preassuming $a_i < 0$, $t_f \rightarrow \infty$ yields

$$N = \begin{pmatrix} -\frac{1}{a_1+a_1} & -\frac{1}{a_1+a_2} & \dots \\ -\frac{1}{a_2+a_1} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} = \text{matrix}\left\{\frac{-1}{a_i+a_k}\right\}. \quad (41)$$

Replacing a_i by $a_i + \Delta a_i$

$$N = \text{matrix}\left\{\frac{-1}{a_{i_0}+a_{k_0}+\Delta a_i+\Delta a_k}\right\} \doteq \text{matrix}\left\{\frac{-1}{a_{i_0}+a_{k_0}} + \frac{1}{(a_{i_0}+a_{k_0})^2}(\Delta a_i+\Delta a_k)\right\} \quad (42)$$

$$N \triangleq N_o + \text{matrix}\left\{\frac{\Delta a_i+\Delta a_k}{(a_{i_0}+a_{k_0})^2}\right\} \triangleq N_o + \Phi. \quad (43)$$

The inverse N^{-1} turns out as

$$N^{-1} = N_o^{-1} - N_o^{-1} \text{matrix}\left\{\frac{\Delta a_i+\Delta a_k}{(a_{i_0}+a_{k_0})^2}\right\} N_o^{-1} \triangleq N_o^{-1} - N_o^{-1} \Phi N_o^{-1} \quad (44)$$

which can easily be verified by calculating $NN^{-1} = I$ using Eqs.(43) and (44). If a vector $\mathbf{k} \triangleq \text{vec}\{k_i\}$ is premultiplied by N^{-1} , the following rearranging procedure is used for separating the increment Δa

$$\begin{aligned} \Phi \mathbf{k} &= \begin{pmatrix} \frac{\Delta a_1+\Delta a_1}{(a_1+a_1)^2} & \frac{\Delta a_1+\Delta a_2}{(a_1+a_2)^2} & \frac{\Delta a_1+\Delta a_3}{(a_1+a_3)^2} & \dots \\ \frac{\Delta a_2+\Delta a_1}{(a_2+a_1)^2} & \frac{\Delta a_2+\Delta a_2}{(a_2+a_2)^2} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \mathbf{k} \equiv \\ &\equiv \begin{pmatrix} \frac{2k_1}{(2a_1)^2} + \frac{k_2}{(a_1+a_2)^2} + \frac{k_3}{(a_1+a_3)^2} + \dots & \vdots & \frac{k_2}{(a_1+a_2)^2} & \vdots & \frac{k_3}{(a_1+a_3)^2} & \vdots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \end{pmatrix} \Delta a \triangleq \Lambda_k \Delta a. \quad (45) \end{aligned}$$

F Increments in the Parameter Vector

Evaluating the right-hand side of Eq.(10), $t_f \rightarrow \infty$ is set for simplification. Notice for $\zeta < 0$

$$\int_0^{t_f} te^{\zeta t} dt \Big|_{t_f=\infty} = \frac{e^{\zeta t_f}}{\zeta} \left(t_f - \frac{1}{\zeta} \right) + \frac{1}{\zeta^2} \Big|_{t_f=\infty} = \frac{1}{\zeta^2}. \quad (46)$$

Hence, in Eq.(10),

$$\int_0^\infty te^{a_i t} \mathbf{h}(t) dt = \int_0^\infty te^{a_i t} \begin{pmatrix} e^{a_1 t} \\ e^{a_2 t} \\ \vdots \\ e^{a_k t} \\ \vdots \end{pmatrix} dt = \text{vec}_k \left\{ \frac{1}{(a_{i0} + a_{k0} + \Delta a_i + \Delta a_k)^2} \right\} \doteq \quad (47)$$

$$\doteq \text{vec}_k \frac{1}{(a_{i0} + a_{k0})^2} - 2 \text{vec}_k \left\{ \frac{\Delta a_i + \Delta a_k}{(a_{i0} + a_{k0})^3} \right\} \triangleq \mathbf{q}_i \in \mathcal{R}^{n_p \times 1}. \quad (48)$$

G Kronecker Reconstructions

By simple inspection, e.g., for $n_p = 3$,

$$[(\text{diag}_i \{ \Delta a_i \}) \otimes \mathbf{1}^T] \mathbf{l} = \begin{pmatrix} \Delta a_1 & 0 & 0 \\ \Delta a_1 & 0 & 0 \\ \Delta a_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta a_2 & 0 \\ 0 & \Delta a_2 & 0 \\ 0 & \Delta a_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta a_3 \\ 0 & 0 & \Delta a_3 \\ 0 & 0 & \Delta a_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ \vdots \end{pmatrix} = \text{diag}_i \left\{ \sum_{j=3i-2}^{3i} l_j \right\} \Delta \mathbf{a} \triangleq \mathbf{L} \Delta \mathbf{a}. \quad (49)$$

Similarly,

$$\begin{aligned} (\mathbf{I} \otimes \Delta \mathbf{a}^T) \mathbf{c} &= \begin{pmatrix} \Delta a_1 & \Delta a_2 & \Delta a_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta a_1 & \Delta a_2 & \Delta a_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta a_1 & \Delta a_2 & \Delta a_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ \vdots \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} c_1 \Delta a_1 + c_2 \Delta a_2 + c_3 \Delta a_3 \\ c_4 \Delta a_1 + c_5 \Delta a_2 + c_6 \Delta a_3 \\ c_7 \Delta a_1 + \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_3 \end{pmatrix} \triangleq \mathbf{C} \Delta \mathbf{a} \end{aligned} \quad (50)$$

where $\text{col } \mathbf{C}^T = \mathbf{c}$.

A. Weinmann

Regelungen. Analyse und technischer Entwurf

Band 1: Systemtechnik linearer und linearisierter Regelungen auf anwendungsnaher Grundlage

Dritte, überarbeitete und erweiterte Auflage
1994. 192 Abbildungen. IV, 258 Seiten.
Gebunden öS 620,-, DM 89,-
Hörerpreis: öS 496,-
ISBN 3-211-82556-8

Im Band 1 werden regelungstechnische Methoden ausführlich behandelt, die häufig zur industriellen Anwendung kommen. Auf die enge Verflechtung von theoretisch-analytischen Verfahren mit synthetischen Methoden und auf die Erfordernisse der technisch-praktischen Realisierung wird großer Wert gelegt. Den Methoden des technischen Entwurfs (zur Erreichung einer bestimmten dynamischen Qualität von Regelungen) wird breiter Raum gewidmet. Zur Regler- und Stellgliedbemessung werden die gängigen Verfahren herangezogen, solche mit schneller Elektronik, Digitaltechnik und Mikroprozessoren jedoch betont. Stets wird der anschauliche, technisch physikalische Hintergrund gewahrt. Für lineare und linearisierte Systeme vermittelt das Buch alle regelungstechnischen Fundamentalmethoden.

Weiters lieferbar:

Band 2: Nichtlineare, abtastende, multivariable und komplexe Systeme; modale, optimale und stochastische Verfahren

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage
1987. 116 Abbildungen und 27 Beispiele. XIII, 278 Seiten.
Gebunden öS 590,-, DM 85,-
Hörerpreis: öS 472,-
ISBN 3-211-81977-0

Band 3: Rechnerische Lösungen zu industriellen Aufgabenstellungen

1986. 103 Abbildungen. XIII, 247 Seiten.
Gebunden öS 540,-, DM 78,-
Hörerpreis: öS 432,-
ISBN 3-211-81925-8

Preisänderungen vorbehalten



Springer-Verlag Wien New York

Sachsenplatz 4-6, P.O.Box 89, A-1201 Wien · 175 Fifth Avenue, New York, NY 10010, USA
Heidelberger Platz 3, D-14197 Berlin · 3-13, Hongo 3-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

"ROBOTICS IN AUSTRIA"

State of the art report

P. Kopacek

Institute of Robotics
University of Technology, Vienna

Abstract

This paper is divided in industrial applications and research at universities and research institutions. According to the last statistics at the end of 1991 1465 robots were in use in Austria. In the paper a short overview on the research on robotics is given. There are two main directions: More theoretical oriented research in the field of kinematics, kinetics, path planning and control and research mainly emphasized to applications mainly in small and medium sized companies. In the last time research is be done in the direction of application of methods of artificial intelligence in form of expert or knowledge based systems as well as in fuzzy control and neuronal networks related to the field of robotics.

1. Robot statistics [1]

In Austria approximately 20 companies dealing with robots or robotic systems are on the market. In 1989 robots to the value of 300 Mio ATS were installed new in our country and 872 industrial robots were in use in Austrian companies. At the end of 1991 this number increased to 1465. Therefore Austria is one of the countries with the highest growing rates according to long term estimations.

An usual characteristic number for the "robotization" of the industry of a distinct country is the number of robots for 10000 employees in this country. This number has increased from 3.4 in 1986 to 7.5 in 1989 and to approximately 10.0 today. One of the reasons for this untypical behaviour in comparison with other countries is the structure of the Austrian industry. The Austrian industry is mainly dominated by small and medium sized companies. These companies started the introduction of industrial robots relatively late - approximately 1984. Today 2 % of the industrial robots are installed in small companies (less than 20 employees); 49 % in medium sized companies (less than 500 employees).

The main application field of industrial robots in Austria is welding (22 %) and not spot welding (only 3 %) as usual in other countries. Handling operations on die-casting (17 %) and CNC machine tools (15 %) are also relevant application fields. Remarkable growing rates are obtained for assembly, palletizing, jet cutting, and research and education applications. Today 35 industrial robots are installed on Universities and other research institutions.

2. Robotic research

As pointed out earlier the Austrian industry is mainly dominated by small and medium sized companies. Therefore robotic research on universities as well as research institutes have to be oriented mainly to industry. Because of the size of Austria these institutes are usually very small in comparison with other countries. We have two Technical Universities (Vienna and Graz) and one University with a Department of Technical and Natural Science (Linz). Therefore robotic research is mainly concentrated on these Universities and on Research Institute (ÖFZS, Seibersdorf). The well known sentence "small is beautiful" is valid for robotic research in Austria. The average size of research groups in Austria is approximately 4. This requires high flexibility and motivation of the researchers. "Theoretically" oriented research on robotics in Austria is financed by some scientific founds. The main task of the Austrian research should be the field of industrial applications. In the Austrian industry a strong demand for flexible and modular "low cost" solution for robotic systems can be obtained.

To transfer international knowledge in the Austrian industry some international scientific events have been or will be organized in Austria e.g. the

IFAC Symposium on "Theory of Robots", 1986, Vienna [2],
IFAC Symposium on "Robot Control", 1991, Vienna [3],
IFAC Symposium on "Low cost Automation", 1992, Vienna [4],
IFAC Workshop "CIM for small and medium sized companies", 1992, Vienna [5],
2nd International Workshop "Robotics in Alpe-Adria Region", 1993, Krems [6],
2nd IFAC Workshop on "Intelligent Manufacturing Systems", 1994, Vienna.

Only one manufacturer of robots dealing with some research activities.

Research at Universities

In the following only some examples of University research activities in the field of robotics can be given.

In the Department of Mechanical Engineering (University of Technology of Vienna) the first Institute in Austria specialized in manipulators and robotics, has been founded in January 1990. This Institute is responsible for the education of students mainly from Mechanical Engineering in robotics and related fields such as microsystems for external sensors, assembly oriented construction, and software for robot control.

The institute is dealing with the field of robot-systems and systems of handling devices, using both theoretical and practical approaches [7]. The theoretical-oriented investigations are related to kinematics and kinetics of industrial robots, and the use of advanced control algorithms. Furthermore emphasis is placed on construction of light-weight robots, methods of pattern-recognition and application of methods of artificial intelligence.

Broad space is left to the use of industrial robots in Austrias industry - especially in small- and medium-sized companies - in connection with tasks of assembly technique. This is very often accomplished in the context of CIM-concepts. For that reason CIM-systems are also part of interest of the institute.

The task of the institute is to do theoretical research in the field of robotics, where industrial applications seem to be future oriented. Furthermore results in research should be utilized for

Austria's industry. The companies of interest are small and medium sized companies. This leads to following research topics: kinematics and kinetics of industrial robots, advanced control algorithms, optimal path planning, flexible robots, coordination of robot motions, sensors and sensor-signals (microsystems), applications, robots in CIM-concepts, assembly with industrial robots, assembly-oriented construction, methods of artificial intelligence in robotics, social and cultural aspects of robotics and low-cost automation [7].

In the next study term lectures on assembly automation, intelligent robots, advanced robot control and intelligent manufacturing systems will be given. The institute of robotics has close contact to the department of Systems Engineering and Automation at the Scientific Academy of Lower Austria in Krems.

In cooperation with the Department of "Systems Engineering and Automation" of the University of Linz an assembly cell equipped with 2 robots was planned, installed and tested in a medium sized company in Upper Austria [8]. This assembly cell works since April 1990 and serves for assembling of 6 different types of primary parts of welding transformers. It is integrated in a "low cost" CIM system [9] which is developed by the two Institutes mentioned above. In this project some peripheral devices such as a soldering device, special grippers and some storage units were developed. In the last time a knowledge based system for diagnosis and maintenance was installed in this cell.

The research of the interfaculty Working Group on "Robotics and Handling Devices" at the Technical University of Vienna is more theoretically oriented. Main topics of the research of this group are kinematics and kinetics of industrial robots, modelling, control and simulation of robots with new methods, optimal path planning in cooperation with the "Institute of Robotics", and collision avoidance. In the field of lightweight robots a new arm structure was designed with 40 % less of mass and the same stiffness than conventional arms. New algorithms of optimal path planning lead to faster movements and a higher accuracy [20].

The needs of the Austrian industry led to the following research topics: Collection and preparation of the geometric, kinematic and kinetic fundamentals for drives, arms and grippers for various types of robots used today. Investigation of possibilities for constructive improvements with the goal to minimize computational and control effort as well as construction costs; catalogization of dynamic models for the different parts (e.g. arms, gears, actuators) and combination of them to models for the whole robot. Development of simple models which are accurate enough for the application of observers. Development of models which take the elastic deformation into consideration, and simplification of such models. The latter can be performed in many cases by simulation only. Collection and development of "advanced", digital control algorithms for the position control. Theoretical and practical comparison of them with regard to suitability and efficiency. Collection and comparison of various methods for path calculation, especially for optimal paths. Simulation tests of control algorithms with the aid of the models being developed. Test of selected nonlinear control algorithms. Test of selected "observers". Application of sensor signals in order to increase the efficiency of the control.

The Institute of "Flexible Automation" (INFA) is working in a very broad range of topics in the field of manufacturing and automation and in the field of robotics [11]. Research subjects in robotics are: robot metrology, robot calibration, modular robot controlling systems, fuzzy technology in robot control, and digital signal processors.

Knowledge of a robot's dynamic behavior and of the absolute accuracy characteristics turns out to be most useful in the development as well as application of robots. Nowadays there are no appropriate measurement systems available to acquire this knowledge. Thus a measurement system to dynamically track the end-effector of a robot was successfully developed.

A laserbeam is deflected over a gimbal mounted mirror into a retroreflector which is mounted to the robot's end-effector. The retroreflector parallelly reflects the beam. Due to the motion of the robot the beam will not strike the retroreflector in its center, thus there is a parallel displacement between the incoming and the reflected laserbeam. This offset is measured and used by the tracking controller to follow any movement of the robot.

A system for robot calibration makes noncontact, dynamic measurements with high accuracy in a large working area and in real-time. Since the measurement process is automatic, it is a very flexible system that enables several applications besides the measurement of robot characteristics.

One of these applications is to use the measurement data, especially pose or path accuracy data, to calibrate the parameters of the robot model. It has been shown that the overall accuracy of a robot can be improved from 3 millimeters to 0.1 millimeters. Besides the measurement accuracy this improvement depends on the model capabilities. Depending on the specific robot, incorporating factors such as backlash, deflection in the joints or links, temperature sensitivity or tumbling of the joint axes increases the number of parameters but also the level of description and therefore the robot accuracy. The developed robot model includes all these factors in a non-redundant and singularity free description. With this accurate model robot accuracy can be improved towards the order of robot repeatability.

Some introductory work has been done on the topics of object-oriented robot simulation. Together with the Minsk Radioengineering Institute, USSR a C++ class library has been programmed. Using this class library a high-level task-oriented programming of robot tasks is possible. This class library could be the basis of a knowledge based robot task planning and simulation system.

The Institute of "Manufacturing Technology" in the Department of Mechanical Engineering of the University of Technology of Vienna was responsible for the foundation of an interuniversity CIM Center called IUCCIM. In this center 8 University Institutes from the University of Technology of Vienna, from the University of Economics in Vienna as well as some companies are involved. In this center industrial robots are installed mainly for tasks of assembly automation as well as machine loading and unloading. Research activities are concentrated to use industrial robots in CIM concepts.

At the Institute of "Mechanics" at the Technical University of Graz some research is done in the field of kinematics of industrial robots. Research work is now concentrated to replace one arm of a robot by one with a new kinematic structure.

The Institute of Production Technology at the Graz University of Technology is highly specialized in precision engineering and metrology.

In the field of robotics a new Anthropoidic Measuring Device AMG-1 has been developed, designed and built at IFT [14]. On one hand AMG-1 can be seen as a passive robot, without drives and control but containing encoders of highest resolution and accuracy, on the other hand AMG-1 is a coordinate measuring machine with exclusively rotatory joints. When connected to a robot, AMG-1 can be used for testing the accuracy of the robot as well as a measuring device, which is handled by the robot. A new mechanic device has been developed which makes it possible to measure geometric errors as well as the dynamic behaviour of a robot. Both the pose axes and the orientation axes are covered [16].

Furthermore a universe Test Field for Robot accuracy has been installed: With the new calibration device the home position and the length and position of all joints of a robot can be determined precisely by means of a simple mechanical equipment consisting of marketable elements [15].

The Department of "Systems Engineering and Automation" at the Scientific Academy of Lower Austria in Krems [12] is involved in research projects dealing with the development of a flexible, modular and "low cost" robotized assembly cell and a sensory equipped low cost gripper for robots [8]. In this project researchers from Slovenia are involved.

The planning of assembly cells was done by hand until now. In regard to the increasing amount of cells this does not seem to be economical in near future. Goal of this project is the development of a software, based on a relational database, which allows a computer aided planning of an assembly cell. In the first step a description of the parts of the assembled products is necessary. After that the operations are described by means of a specially developed "Assembly Symbol Language", which allows a standardized and formalized description of the operations. The components necessary for the realization of this assembly task are determined under direction of the planner on base of the task description (parts, operations), the data of the single components available in the component database. The utilization of the planning software should decrease the time of passage in planning of flexible assembly cells and increase the quality at the same time.

Since 1993 a 3 year research project with the laboratory of assembly automation at the University of Ljubljana dealing with intelligent assembly is supported by the Austrian government.

The research at the department of 'Systems Engineering and Automation' of the Institute for System Sciences at the Kepler University Linz is mainly concerned with computer support of the design and execution of socio-technical processes, be it in the area of software engineering, flexible manufacturing or office automation. The synergetic effect of these three areas together proves especially fruitful with respect to computer supported engineering environments [17, 18].

The subproblem of gripping objects is also investigated. . An automatic tool for the fine-motion planner of a robot controller, the main challenge being the choice of appropriate contact planes for the robot gripper.

In the domain of flexible robotic cell design and control a project is concerned with helping cell designers in decision making using a rule based fuzzy system.

Closely related is work on the intelligent, real-time control and monitoring of robotic workcell based on discrete event simulation.

Research in Centers

Two research Institutes in Austria work in the field of robotics besides of other projects. The Austrian Research Center Seibersdorf (ÖFZS) is mainly involved in practically oriented research. Currently projects are: robots in assembly automation, for palletizing and for welding operations.

RISC-Linz (Research Institute for Symbolic Computation) deals with symbolic computation covers all algorithmic aspects of solving problems with symbolic (i.e. non-numeric) objects [12].

One of the most promising areas of applications for symbolic computation is softautomation including robotics. Many subproblems in the simulation, analysis, control, and supervision of robots or whole robot working cells can be attacked by symbolic techniques like geometric modeling, computational geometry, algebraic geometry, knowledge engineering, computer graphics. Research topics in past and current projects are: Gröbner bases for computing inverse kinematics, path planning for non-synchronized motions, Roider method for collision detection, NC-SAVE, simulation and verification environment for NC machining, Voronoi diagrams for path finding, robot vision based on geometric modeling.

Research by Industry

The main producer of industrial robots in Austria, the company IGM, has developed a robot controller based on transputers during the last years. Transputer technology offers the possibility to build up an open and modular control concept. Furthermore in that company a laserbased sensor was worked out primarily for welding operations. This sensor should be used in the nearest future for flame cutting operations as well as for assembling operations.

For new applications serve two examples. Three robots in identical compact systems weld passenger car seats. For welding the seat frames and the back-rests a very restricted area is available. Loading and clamping of the single components, and unloading of the completed parts is done manually. For the manufacturing in 2 stations, identical simple devices are used. Shortest possible cycle times require optimum workpiece accessibility in the holding fixtures and minimum loading times.

The single part of the heat exchangers are manually put into the fixture. For the subsequent soldering the fixing brackets are to be accurately positioned on the workpiece. For this purpose, the robot effects up to 10 tack welds per bracket, needing 2 seconds per tacking point.

3. Summary

Austria as a very small country has only a real chance in the field of robotics - like in other so called high tech fields - by trying to modify and applicate research results mainly for small and medium sized companies. This requires the development of flexible, modular low cost solutions for robotic systems.

In the near future assembly automation will be of great importance for the Austrian industry. Therefore the development of low cost sensors in the direction of intelligent robots must be a research topic in Austria in the future probably by means of tools from microsystems.

Furthermore the methods of artificial intelligence e.g. intelligent diagnosis systems should be introduced in robotics research in Austria.

4. Literature

- [1] Moos, H.: Industrieroboterstatistik, WIFI 1991.
- [2] Preprints of the International Symposium on "Theory of Robots", Vienna, 1986.
- [3] Preprints of the International Symposium on "Robot Control", Vienna, 1991.
- [4] Preprints of the International Symposium on "Low cost Automation", Vienna, 1992.
- [5] Preprints of the International Workshop "CIM for small and medium sized companies", Vienna, 1992.
- [6] Preprints of the International Workshop "Robotics in Alpe-Adria Region", Krems, 1993.
- [7] Activity report of the Institute of "Handling devices and Robotics", Univ. of Technology Vienna, 1992.
- [8] Kopacek, P. and Fronius, K.: CIM Concept for the Production of Welding Transformers. Preprints of the IFAC Symposiums Information Control Problems in Manufacturing Technology, (INCOM '89), Madrid 1989, Volume 2, p. 737 - 740.
- [9] Kopacek, P., A. Frotschnig and M. Zauner: CIM for small companies, Preprints of the IFAC Workshop on "Automatic Control for Quality and Productivity-ACQP '92" Istanbul 1992, p. 35 - 41
- [10] Activity report of the working group on "Industrial Robots and Handling Devices", Univ. of Technology Vienna, 1991.
- [11] Activity report of the Institute for Flexible Automation Univ. of Technology Vienna.
- [12] Activity report of the Department of "Systems Engineering and Automation", Scientific Academy of Lower Austria Krems, 1992.
- [13] Stifter, S.: Research Activities in Robotics at RISC-Linz, Preprints on the International Workshop "Robotics in Alpe-Adria Region", 1993.
- [14] I. Kovac, A. Frank, Robot guided Anthropoidic Measuring Device, Preprints of the 2nd International Meeting on Robots in Alpe Adria Region, Krems 1993, pp. MO 1.1-1-MO 1.1-5
- [15] I. Kovac, A. Frank, A novel Industrial Robot Calibration Device. Proceedings of the 1st International Meeting on Robots in Alpe Adria Region, Portoroz 1992, pp. 162-167.
- [16] I. Kovac, Pose- und Bahngenaugkeitsprüfung von Robotern nach ISO 9283, Technik Report Wien, 9A, September 1993, pp. 20-22.
- [17] Beder M.: An Intelligent Navigator for Robotic Workcell Planning and Control.-R. Trappl (ed.) Cybernetics and Systems '94 , World Scientific, Singapore, New Jersey, 1994, pp. 1459- 1466.
- [18] Chroust G., Jacak W.: Simulation in Process Engineering.- Rozenblit J. (ed.): AIS-93, 4th Conf. on AI, Simulation, and Planning in High Autonomy Systems, Tuscon Sept 1993, IEEE C/S Press pp. 232-237.

IMACS Symposium on Mathematical Modelling 1st MATHMOD Vienna

Vienna, Feb. 2-4, 1994

I. Troch, TU Wien

The analysis and improvement of performance in complex systems, the adaptation of plants to new demands or conditions and the design of 'optimal' systems are a few of the challenges confronting engineers, systems scientists and applied mathematicians today. In many cases solutions to problems in areas such as these may be found through the use of appropriate mathematical models. The dynamic case, whether continuous time or discrete time, deterministic or stochastic, presents special challenges and derivation of an appropriate solution depends strongly on the proper initial formulation of the goals and constraints. Increasingly this demands an interdisciplinary approach to modelling.

Such a model is intended to help for a better understanding of what is going on in the system and especially to assist in finding a good solution of the problem to be solved. There is a rather broad consent that modelling is of intrinsic importance and that the quality of a solution depends strongly on the quality of the model.

However, one can observe that e.g. modelling approaches, methods for model simplification or for parameter estimation are developed and modified quite frequently and quite many things are discovered repeatedly. Therefore, many discussions during congresses and conferences showed the desire for a forum with mathematical modelling as its center whereas the solution of the underlying problem remains in the background is of peripheral interest only.

Models of the kind discussed above can take the form of sets of equations, graphs or nets, or some combination of elements such as these. The derivation, combination, simplification and validation of models and sub-models were the main topics of the IMACS symposium on Mathematical Modelling which was held in Vienna during February 2-4, 1994.

A selection of contributions to this conference will be published in a special double issue of the IMACS journal 'Mathematics and Computers in Simulation'. This selection will contain all three invited survey lectures and 21 contributed papers (out of some 190). The invited lectures deal with model validation, Bond graphs and Petri nets whereas the other contributions treat various modelling approaches such as iterative design of models, mechanistic modelling, object-oriented modelling or qualitative modelling or demonstrate modelling approaches for typical areas of applications such as mechanical and electrical engineering, biology, environmental sciences etc. Further seven contributed papers were selected out of 17 contributions in the robotic field for publication in a special issue of the Journal of Intelligent and Robotic Systems.

By this arrangement, the editors of these publications hope to stimulate not only further research but also a continuation of the discussions between scientists and engineers working in various areas of specialization. Such discussions were one of the most important factors for the success of 1st MATHMOD Vienna, they started in the lecture rooms, were continued during coffee breaks and were taken up again at the reception in the town hall and some of them even at the recreation at a Viennese Heuriger.

Many participants asked for a 2nd MATHMOD which is intended to take place in about three years in Vienna.

Bericht über den Europäischen IMS-Information Event

7./8. April 1994
Patras, Griechenland.

P. Kopacek

Diese europäische Informationsveranstaltung diente dazu, die Ergebnisse der 6 Testcases der weltweiten IMS Initiative zu präsentieren, zu evaluieren und zu diskutieren. Vor 2 Jahren begann die internationale IMS Gruppe, bestehend aus Australien, Kanada, Japan, Europa (EG und nicht EG) und USA, 6 Testcases zu definieren, um an ihnen zu prüfen, inwieweit eine weltweite wissenschaftliche Kooperation größeren Rahmens möglich ist. An diesen 6 Testcases beteiligten sich 140 Partner aus der Industrie oder Forschungseinrichtungen. Diese 6 Testcases waren:

- TC 2: Clean Manufacturing in the Process Industries
- TC 3: Global Concurrent Engineering - Evaluation and Implementation
- TC 4: Global Manufacturing - GLOBEMAN 2I
- TC 5: Holonic Manufacturing Systems
- TC 6: Rapid Product Development
- TC 7: Knowledge Systemization - GNOSIS .

Österreich war in keinem der 6 Testcases vertreten, obwohl vergleichbare Länder, wie beispielsweise Finnland, eine sehr starke Beteiligung aufwiesen. Es wurde übereinstimmend festgestellt, daß alle 6 Testcases positiv abgeschlossen wurden und daß eine weltweite, wissenschaftliche Kooperation auf dem Gebiet IMS möglich ist. Als weiterer Schritt sollen nun wirkliche Forschungsprojekte definiert werden.

Hauptziel dieser Tagung war es daher, die weitere gesamteuropäische Vorgehensweise zu diskutieren. Bis spätestens September oder Oktober 1994 sollen Projekte definiert werden, über deren Finanzierung des europäischen Anteiles in Brüssel entschieden wird. Diskutiert wurde eine Förderung im Rahmen bestehender Projekte, wie beispielsweise EUREKA, ESPRIT oder FAMOS.

Von den Rapporteuren der einzelnen Testcases wurde übereinstimmend festgestellt, daß die Overheadkosten bei einer weltweiten Zusammenarbeit sehr hoch sind. Sie können durch moderne Kommunikationstechnologien wie E-mail oder Datatransmission jedoch in erträglichen Grenzen gehalten werden. Eine Kooperation kann umso besser gestaltet werden, je tiefer die persönlichen Kontakte zwischen den einzelnen Projektpartnern sind. In manchem der Testcases dauerte der Aufbau der Kontakte relativ lange, sodaß die ganze Projektarbeit vorzüglich in den letzten Monaten erledigt wurde. Dies ging soweit, daß sich ein eigenes "Clubdenken" entwickelte. So trugen beispielsweise die Vertreter eines Testcases Krawatten mit dem entsprechenden Logo.

Ein spezielles Problem aus österreichischer Sicht dürfte die Definition von Klein- und Mittelbetrieben sein. Im Sinne der Definition des Präsentators des Testcase 3 ist ein Kleinbetrieb ein solcher mit weniger als 50 Mill. engl. Pfund Umsatz im Jahr und ein mittlerer mit weniger als 500 Mill. Pfund jährlich. Dies steht im krassen Gegensatz zu der österreichischen Definition: < 50 Mitarbeiter Kleinbetrieb, < 500 Mitarbeiter Mittelbetrieb.

Im Rahmen der Präsentation des TC7 wurde ausgeführt, daß technologische Entwicklungen weltweit meistens in Klein- und Mittelbetrieben dieser Größenordnung stattfindet. Es hat sich jedoch herausgestellt, daß die Umsetzung der gewonnenen neuen Erkenntnisse sehr schwierig in dem Framework solcher Betriebe ist. Klein- und Mittelbetriebe dienen als Katalysator für den Markt. Sie haben aber auf der anderen Seite die Mechanismen der internationalen Kooperation kennenzulernen und umzusetzen. Sie sind üblicherweise nur in der Lage, national zu kooperieren.

Als Hauptproblem in den 6 Testcases wurde wie üblich die Finanzierung angesprochen. Dies ist nicht verwunderlich, da die von den einzelnen Projektpartnern aufzubringenden Projektkosten je nach Testcase zwischen 2 und 8 Mill. ECU betragen.

Die weitere Vorgehensweise in der ims Gruppe besteht nun darin, daß von den einzelnen teilnehmenden Nationen Projekte definiert und deren Finanzierung auf nationaler Ebene gesichert wird. So haben z.B. die amerikanischen Teilnehmer am 23. und 24. Juni eine Tagung, in welcher diese Themenkreise besprochen werden sollen. Ähnliche Aktivitäten sind in Australien und Kanada geplant. Japan hat, wie dem Statusreport des IARP Meetings in Monterey zu entnehmen ist, bereits Projekte definiert und deren langfristige Finanzierung gesichert.

Zusammenfassend kann aus österreichischer Sicht festgestellt werden, daß es hoch an der Zeit ist, sich an diesen neuen Projekten gezielt zu beteiligen. Es ist evident, daß sich von den zu definierenden Megaprojekten nur kleine Spektrallinien für österreichische Klein- und Mittelbetriebe eignen. Gleiches gilt für österreichische Universitätsinstitute sowie Forschungseinrichtungen. Es wäre daher wertvoll in der Projektphase diese noch näher zu definierenden "Spektrallinien" in geeigneter Form einzubringen. Eines der Hauptprobleme dürfte dabei in der unterschiedlichen Definition von Klein- und Mittelbetrieben im Sinne der EU und Österreich liegen. Es ist daher umgehend notwendig, mit potenten österreichischen Firmen und Institutionen Kontakt aufzunehmen und mit ihnen rechtzeitig solche forschungsmäßige Spektrallinien zu definieren.

Bericht vom 25. Internationalen Symposium Industrial Robots (ISIR 94),

Hannover, 25. - 27. April 1994.

P. Kopacek

Das diesjährige ISIR, das 25. seiner Art, fand im Rahmen der Hannover Messe Industrie statt. Seit dem 1. Symposium 1970 in Chicago wechselte der Austragungsort jedes Jahr abwechselnd zwischen Japan und den anderen Ländern statt. Es ist damit auf dem Gebiet der Robotertechnik das am längsten bestehende Symposium seiner Art. Das nächste wird im Jahr 1995 in Singapur stattfinden.

Ziel dieses ISIR Symposiums war es immer, in Form einer ausgewogenen Mischung von Praxis und Theorie, ausgeführte Roboteranwendungen vorzustellen, sowie Zukunftstrends aufzuzeigen. Auf diesem 25. Symposium wurde festgestellt, daß Industrieroboter eine eingeführte Technologie ist und der Industrieroboter auf der Produktionsebene ein tool wie eine CNC-Maschine eine Transportsystem oder eine Montagezelle ist. Derzeit sind schätzungsweise 600 000 Industrieroboter weltweit im Einsatz. Das bedeutet, jeder Arbeitsplatz, an welchem sinnvoll ein Industrieroboter eingesetzt werden kann, ist bereits mit einem solchen bestückt. Dies führte dazu, daß in den letzten zwei Jahren die Zuwachsraten der Industrieroboter weit hinter den prognostizierten zurück blieben. Trotz eines Preisverfalls um 40 - 50% kämpfen die Industrieroboterhersteller derzeit mit Absatzproblemen. Es wird versucht, Kosteneinsparungen bei der Programmierung, beim Service und bei der Schulung zu realisieren, sodaß in Zukunft ein Industrieroboter einschließlich der Peripherie um ca. DM 60.000,- verfügbar sein wird. Dies wird unter anderem dadurch ermöglicht, daß die Steuerrechner extrem verbilligt werden bzw. eine Modularisierung des kinematischen Aufbaues des Roboters erfolgt. Die Industrieroboterhersteller beginnen sich derzeit nach neuen Anwendungsmöglichkeiten umzusehen, um diese Markteinbrüche wettzumachen. Hoffungsgebiete sind hier die Service-Roboter sowie die Personal-Robots.

In Deutschland sind Ende 1993 43715 Industrieroboter im Einsatz. In Österreich sind es laut einer Statistik der Bundeswirtschaftskammer ungefähr 2000, wobei aber festzustellen ist, daß die Definition eines Industrieroboters in Deutschland und in Österreich unterschiedlich ist. Es zeigt sich immer mehr, daß viele Anwendungen in der Industrie kostengünstig nicht vertretbar sind. Das Hoffungsgebiet des Industrierobotereinsatzes, die Montage wird immer problematischer, da diese nur betriebswirtschaftlich sinnvoll ist, wenn die Voraussetzungen wie montagegerechte Konstruktion und Produktgestaltung hundertprozentig befolgt werden. Gefragt sind nach wie vor komplette Systemlösungen was dazu führt, daß Engineering-Firmen, die sich mit Komplettlösungen auf dem Robotik-Markt beschäftigen, sich im Aufwind befinden.

Die Roboterindustrie beschäftigt sich derzeit verstärkt mit Standardisierungsproblemen der Informatik. Die Planung und Simulation von roboterbestückten Produktionszellen wird durch die Animation ganzer Systeme vereinfacht. Darüber hinaus wird verstärkt an der Programmierung einer einheitlichen Benutzeroberfläche für die Off-Line Programmierung wie beispielsweise Windows gearbeitet.

Neue Anwendungsgebiete für Industrieroboter eröffnen sich in der Schiffsfertigung, in der Forstwirtschaft und hier insbesondere in der Holzverarbeitenden Industrie, in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie sowie in der Pharmaindustrie. Diese Anwendungen stellen neue Anforderungen an die Industrieroboter wie beispielsweise Reinraumbedingungen, Vakuum, Weltraum. Nach wie vor stellt die Demontage ein Hoffungsgebiet des Industrierobotereinsatzes dar. Derzeitig realisierte Pilotprojekte sind die automatisierte Demontage von Waschmaschinen, Computern und Autobaugruppen.

Ein weites Anwendungsgebiet soll sich nach den Aussagen der Hersteller auf dem Gebiet der Serviceroboter eröffnen. Roboteranwendungen, die vor 20 Jahren als Cartoons erschienen, und vor 5 Jahren utopisch erschienen, rücken jetzt immer mehr in den Blickpunkt des Interesses. Haushaltsroboter, Roboter zur Rehabilitation, Roboter in Vergnügungsparks usw. sind keine Utopie mehr sondern sollen in den nächsten Jahren verwirklicht werden. Diese Anwendungsgebiete stellen jedoch exorbitant hohe Anforderungen an die externe Sensorik der Industrieroboter. Visuelle, taktile und auditive Sensoren sind hier unbedingt erforderlich. Diese Roboter sind an der Grenze zu Sondermaschinen und erfordern daher exorbitant hohe Entwicklungskosten. Derzeit sind nur wenige Firmen gewillt, diese hohen Entwicklungskosten in einen unsicheren Markt zu investieren.

Die Beiträge auf dem 25. ISIR beschäftigten sich überwiegend mit diesen neuen Anwendungsgebieten, wobei die theoretischen Arbeiten wohlthuend in den Hintergrund traten.

Auf der gleichzeitig stattfindenden Hannover Messe waren in drei Hallen rund 250 Aussteller vertreten, welche im weitesten Sinne dem Gebiet der Roboter zugeordnet werden können. Die überwiegende Anzahl beschäftigt sich mit der Entwicklung von peripheren Geräten, welchen auch in Zukunft ein großer Marktanteil prognostiziert wird. Die klassischen Roboterfirmen stellten Neuentwicklungen vor, wobei sehr wenig von intelligenten Industrierobotern zu sehen war. Vielmehr ist ein Entwicklungsschwerpunkt die Verbilligung der Industrieroboter in Blickrichtung des Personal-Robots.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich in der Robot-Community derzeit eine gewisse Ratlosigkeit breit macht. Klassische Forschungsgebiete wie Kinematik, Kinetik und flexible Roboter sind nicht mehr aktuell und die neuen noch nicht richtig definiert. Sehr spezielle Anwendungen und Konstruktionen, welche mit dem Aussehen eines konventionellen Roboters wenig zu tun haben, werden zukünftig die Roboterszene prägen. Es bleibt zu überprüfen und zu definieren, ob diese Dinge überhaupt noch als Roboter zu bezeichnen sind. Es bleibt in den nächsten ein bis zwei Jahren abzuwarten, inwieweit sich die Anwendungsgebiete in Richtung Service-Robots durchsetzen werden.

13. Joint Coordination Forum (JCF) des International Advanced Robotics Program (IARP)

7. Mai 1994
Monterey; USA

P. Kopacek

IARP wurde 1982 in Versailles gegründet. Unter dem Dach weiterer internationaler, wissenschaftlicher und technologischer Kooperation, welche für das Wachstum und die Revitalisierung der Weltwirtschaft notwendig ist, wurden 18 kooperative Forschungsthemen definiert zu denen auch "Advanced Robotics" zählte. Ursprünglicher Zweck von IARP war es, internationale Kooperationen im Feld "fortgeschrittene" Roboter (Advanced Robotics) zwischen entwickelten Ländern, basierend auf eigenen Forschungsergebnissen und Finanzierungen zu etablieren. Die Mittel dazu waren

- ein jährliches Joint-Coordinating Forum (JCF), an welchem Repräsentanten, die für Forschungs- und Entwicklungsgelder sowie Strategien verantwortlich sind, zusammenkommen,
- Austausch von Informationen, Organisation von Studienmissionen und Wissenschaftlern
- Vorschläge für gemeinsame Standards
- Einführung von gemeinsamen Evaluierungskriterien für Forschungsprojekte

Im Laufe der zwölf Jahre wurden Ziele und Möglichkeiten von IARP umdefiniert. Die derzeitigen Ziele sind in der letzten IARP-Broschüre enthalten und lauten sinngemäß:

Der Zweck von IARP ist es, fortgeschrittene Robotersysteme zu entwickeln, welche in der Lage sind, den Menschen von schwierigen und gesundheitsgefährdenden Arbeiten zu entlasten, und auf diese Weise zum Wachstum der Weltwirtschaft beizutragen.

Die derzeitigen IARP Aktivitäten bestehen in

- Abhaltung des jährlichen Workshops (JCF)
- Sammeln und Verteilen von Status-Reports über Forschung und Entwicklung von Advanced Robotics in den Teilnehmerländern
- Abhaltung von Workshops
- Austausch von Studienmissionen
- Austausch von Forschern
- Durchführung von gemeinsamen Studien.

Dies waren im wesentlichen die Ergebnisse eines Memorandums, welches von einer Arbeitsgruppe von IARP erarbeitet wurde und auf dem diesjährigen Meeting zur Diskussion standen.

Im vergangenen Jahr wurden folgende Workshops abgehalten:

- Micromachine Technologies and Systems, Tokyo, 1993
- Robots in Agriculture and Food Processing, Brisbane, 1993
- Micro Robotics and Systems, Karlsruhe, 1993
- Underwater Robotics, Monterey, 1994

In nächster Zeit sollen folgende Workshops abgehalten werden:

- Robots in Space, Montreal, 1994
- Workshop on Robotics in Medical Health Care, Pisa, 1994
- Robotics for the Service Industries, Sidney, April oder Mai 1995
- Robotics in Agriculture and the Food Industry, Valencia

Eine längere Diskussion ergab sich bezüglich des in Brisbane vorgeschlagenen Workshops "Human Factors in Advanced Robotics", Sept. 18. - 20. 1995 in Wien, in Kooperation mit der IFAC und der ISIR. Es wurde dezidiert festgestellt, daß von der Struktur her, IARP-Workshops aufgrund des Einladungsprinzips und damit verbunden keiner Teilnehmergebühr nicht geeignet sind im Zusammenhang mit anderen Organisationen abgehalten zu werden. Nach längeren, teilweise heftigen Diskussionen zogen Martin (Deutschland) und Kopacek (Austria) das Workshop aus dem IFAC Veranstaltungskalender zurück. Dieses Workshop wird nun als reines IFAC-Workshop in Zusammenarbeit mit der ISIR am 19. und 20. Sept. 1995 in Wien abgehalten.

Für die traditionelle Präsentation der Status-Reports aus den einzelnen Mitgliedsländern blieb diesmal sehr wenig Zeit. Dies war umso bedauerlicher, da dieser Teil des Meetings einen Überblick über Roboterforschungen in den einzelnen Mitgliedsländern gegeben hatte. Der österreichische Status-Report ist indieser Zeitschrift enthalten.

Interessant an den Status-Reports ist vielleicht, daß weltweit verstärkt auf dem Gebiet der Senrice-Robots geforscht wird. Darüber hinaus sind die meisten europäischen Teilnehmerstaaten in sehr großem Ausmaße in EU-Projekte auf diesen Gebieten involviert. Von Interesse für Österreich ist vielleicht der Teil über die IMS-Initiative im japanischen Status-Report.

Dies waren im wesentlichen die Ergebnisse eines Memorandums, welches von einer Arbeitsgruppe von IARP erarbeitet wurde und auf dem diesjährigen Meeting zur Diskussion standen.

IEEE International Conference on Robotics and Automation

San Diego, USA, 8. - 13. Mai 1994

P. Kopacek

Neben dem im gleichen Heft besprochenen Symposium über „Steuerung und Regelung von Robotern - Symposium on Robot Control (SYROCO)“ stellt diese Konferenz das weltweit bedeutendste wissenschaftliche Ereignis auf diesem Gebiet dar. Das ISIR Symposium - ebenfalls hier erwähnt - ist hauptsächlich industrie-orientiert, während die beiden vorerwähnten eher theoretisch ausgerichtet sind. Da alle drei Veranstaltungen in einem Zeitraum von nur fünf Monaten stattfanden, bietet sich die Möglichkeit einen Eindruck von dem Stand und den Entwicklungstendenzen der Robotik weltweit zu bekommen.

Traditionellerweise ist die jährlich stattfindende IEEE Konferenz von der Teilnehmer- und der Paperanzahl die größte. Sie hat allerdings den regionalen Schwerpunkt USA und Kanada. So waren auch diesmal mehr als 1000 Teilnehmer zu verzeichnen - es wurden mehr als 600 papers sowie 5 Surveypapers präsentiert. Es ergibt sich hier wieder die nahezu schon klassische Frage nach der Sinnhaftigkeit solcher Monsterveranstaltungen. Sie erfüllen aber sicher den Zweck eines gesellschaftlichen Ereignisses.

Fachlich kann die Konferenz als Fortsetzung der ISIR angesehen werden. Im Mittelpunkt des Interesses standen auch hier die Serviceroboter, wobei allerdings bereits mehr konkrete Anwendungen vorgestellt wurden. Einige Unternehmen in den USA und Kanada beschäftigen sich bereits seit Jahren mit diesem Fachgebiet und sind daher etwas weiter wie die Europäer. Die Serviceroboter erfordern eine Reihe von Entwicklungen, wodurch nicht verwunderlich ist, daß autonome oder mobile Roboter ebenfalls im Mittelpunkt des Interesses standen. Diese Roboter bewegen sich - zum Unterschied zu derzeit üblichen - nicht auf durch Induktionsschleifen vorgegebenen Bahnen, sondern frei im Arbeitsbereich. Dies bedingt einen erhöhten Aufwand an Sensorik und dadurch die Anwendung „fortgeschrittenerer“ Bahnplanungs- und Lageregelalgorithmen. Serviceroboter bedingen auch neue Ansätze hinsichtlich der koordinierten Zusammenarbeit mehrerer Roboter. Arbeiten zu diesem Themenkomplex wurden ebenfalls in großer Anzahl präsentiert. Neue Roboterstrukturen und Konzepte dienen ebenfalls der Entwicklung von Servicerobotern.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich die überwiegende Anzahl der theoretisch orientierten Arbeiten mit klassischen Problemstellungen, wie beispielsweise Kinematik und Kinetik sowie Regelungen auseinandersetzen. Industriell einsetzbare Sensoren, Transputersysteme sowie neue Konzepte bei Aktoren werden die zukünftige Entwicklung in praktischer Hinsicht beeinflussen.

IFAC Workshop „Intelligente Produktions- und Fertigungssysteme - Intelligent Manufacturing Systems “ ims'94

Wien, 13. - 15. Juni 1994

P. Kopacek

Die IFAC beschäftigt sich offiziell seit 1983 mit intelligenten Produktions- und Fertigungssystemen. In diesem Jahr wurde innerhalb des Technical Committees „Manufacturing Technology“ eine Working Group gegründet. Vorüberlegungen gehen auf das Jahr 1978 zurück. Die IFAC ist somit weltweit die erste Organisation, welche diesen Entwicklungstrend bereits frühzeitig erkannt hat. Nach dem ersten Workshop im Oktober 1992 in Dearborn (USA) fand das zweite nun in Wien statt.

Die ims Welt wurde zwischenzeitlich durch die von Japan initiierte und 1988 gestartete weltweite ims Initiative geprägt. Ab 1990 beteiligten sich Japan, Australien, Kanada, USA und die EG an 6 Testcases, an denen geprüft werden sollte inwieweit eine weltweite Forschungsk Kooperation unter Einsatz modernster Kommunikationstechnologien möglich ist. Diese 6 Testcases waren:

- TC2: Clean Manufacturing in the Process Industries (Europa, Kanada, USA)
- TC3: Global Concurrent Engineering (alle fünf Regionen)
- TC4: Global Manufacturing - GLOBEMANN 21 (alle fünf Regionen)
- TC5: Holonic Manufacturing Systems (alle fünf Regionen)
- TC6: Rapid Product Development (USA, Europa, Australien, Kanada)
- TC7: Systematisation of Knowledge - GNOSIS (alle fünf Regionen)

An ihnen beteiligten sich 65 Partner mit einem Finanzierungsvolumen von 500 Mio \$. Die Ergebnisse der Testcases wurden im Dezember 1993 präsentiert. Eine europäische Veranstaltung fand im April 1994 in Patras statt. Übereinstimmend wurde festgestellt, daß die gestellten Aufgaben erfüllbar sind. Seither sind Diskussionen um erste wirkliche Projekte im Gange. Für Europa liegt die Koordinierung bei der DG XIII in Brüssel.

Das gegenständliche Workshop ist daher vor diesen Hintergrund zu betrachten und zu evaluieren. Aus ungefähr 130 eingereichten Abstracts wurden 97 ausgewählt, von denen 85 Arbeiten präsentiert wurden. Es konnten 105 Teilnehmer aus 24 Ländern verzeichnet werden. ims kann in sehr vereinfachter Weise als Integration von KI-Methoden in die 5 CIM-Komponenten aufgefaßt werden. Sie behandeln in ausgewogener Weise

- ICAD ... Intelligent CAD (intelligenter rechnergestützter Entwurf)
- ICAP ... Intelligent CAP (intelligente rechnergestützte Planung)
- ICAM ... Intelligent CAM (intelligente rechnergestützte Fertigung)
- ICAQ ... Intelligent CAQ (intelligente rechnergestützte Qualitätssicherung)
- IPPS ... Intelligent PPS (intelligente rechnergestützte Produktionsplanung)

Am weitesten ist dabei ICAD und IPPS einschließlich der Managementtechniken gediehen. Die implementierten KI-Methoden entlasten den Benutzer überwiegend von immer wiederkehrenden Denkprozessen, wobei aber konkrete Vorschläge gemacht werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß diese neue Technologie noch am Anfang der industriellen Einführung ist, aber ein effizientes Werkzeug zur Steuerung der Produktionsflexibilität von Klein- und Mittelbetrieben darstellt.

Dies war auch der Hauptgrund warum vor diesem internationalen Hintergrund eine nationale Veranstaltung abgehalten wurde. In Kurzvorträgen gaben internationale Experten den 80 Teilnehmern - überwiegend aus österreichischen Klein- und Mittelbetrieben - Hinweise für eine effiziente Einführung dieser neuen Technologie sowie nationale und EG Förderungsmöglichkeiten.

Aufgrund der Aktualität des Themas wurde von den IFAC Gremien beschlossen das nächste Workshop bereits nächstes Jahr in Bukarest abzuhalten.

Nachlese zum „International Symposium on Robotics and Manufacturing - ISRAM'94“

Maui/Hawaii, 14. - 17. 8. 1994

Dr. R. Probst und Dipl.-Ing. G. Kronreif

Die Organisation des Kongresses entsprach der Mischung aus hawaiianischer „hangin' loose“-Mentalität und typisch amerikanischer Perfektion. Trotz des dicht gedrängten Programms - zirka 350 Teilnehmer verteilten sich mehr oder weniger gleichmäßig auf die über 200 gebotenen Vorträge - gelang es den Veranstaltern, diesen Kongreß bemerkenswert reibungslos durchzuführen.

Im Bereich der flexiblen Fertigung wurden die Vorträge unter anderem durch die Schlagworte „Cellular Manufacturing Systems CMS“, „Group Technologie GT“ und „Intelligent Products“ beherrscht. Grundlage dieser Ansätze ist es, ähnliche Teile zu Familien zusammenzufassen und dieser Gruppe anschließend die zur Durchführung der Fertigungsprozesse geeigneten Maschinen zuzuweisen. Diese Produktfamilie-Maschinen-Gruppen bilden kleine, gut regelbare Einheiten. Die damit verbundenen Fragestellungen betreffend Logistik oder Scheduling waren Inhalt einiger interessanter Beiträge.

Erfreulich ist es, daß sich inzwischen die Erkenntnis weitestgehend durchgesetzt hat, daß die Simulationstechnik am ehesten in der Lage ist, neue Konzepte in Fertigungstechnik und Logistik entsprechend zu analysieren und zu bewerten. Wie das „Simulationssystem der Zukunft“ letztlich aussehen wird, ist jedoch noch unklar. Es ist einerseits (endlich) feststellbar, daß der objektorientierte Modellansatz klare Vorzüge aufweist - wie weit die Simulation durch Unterstützung von genetischen Algorithmen, AI oder Expertensystemen verbessert werden kann, ist dagegen noch nicht vollständig ausdiskutiert.

Ein weiterer Themenkomplex sind Forschungen mit unbemannten Fahrzeugen für gefährliche oder unbekannte Umgebungen. Diese oft von militärischen Einrichtungen betriebenen Forschungen beschäftigen sich vorwiegend mit der On-Line Planung von Wegen. Dabei werden Video-Systeme, die dem Operator Bilder in Fahrtrichtung liefern, benutzt, um darauf Punkte zu markieren, zu denen sich das Fahrzeug dann selbstständig bewegt. Ein weiterer Einsatz solcher unbemannter Fahrzeuge liegt in der Überwachung bzw. Sicherung von Lager- und Fabrikhallen während der Nacht. Dabei ist das Problem der Koordinierung der einzelnen Roboter sowie die sichere Datenübermittlung in die Sicherheitszentrale ein zentraler Punkt.

Der Einsatz von Sensoren in der Robotik und hier im speziellen "Low-Cost"-Sensoren bilden einen weiteren Themenschwerpunkt. Dabei ist einerseits die Nutzung dieser Sensoren bei Weltraum-robotern und andererseits für Montage bzw. Demontagesysteme behandelt worden.

Ein weiteres Highlight bildete die Panel-Discussion über die Möglichkeiten von FUZZY-LOGIC in der Steuerungs- und Regelungstechnik. Dabei sind im wesentlichen folgende zeitweise stark konträre Standpunkte festzustellen:

- Einige Wissenschaftler sehen im Einsatz von Fuzzy-Logic in vielen Bereichen, auch in solchen die bereits vernünftige herkömmliche Lösungen aufweisen, als unbedingt notwendig an.
- Die Mehrheit sieht Fuzzy-Logic als weiteres Tool in einer gut sortierten "Werkzeugkiste" zur Problemlösung an.
- und eine dritte Gruppe kann in Fuzzy-Logic im wesentlichen keine Verbesserung zu herkömmlichen Lösungsverfahren feststellen.

Neben dieser Panel-Discussion hatte der „Vater der Fuzzy-Logic“, Lotfi A. Zadeh, in einem Plenary-Vortrag die Gelegenheit, in einem launigen Vortrag seine persönlichen Vorstellungen für die Zukunft dieses „Werkzeugs“ zu skizzieren.

Neben dem Einsatz „Neuer Technologien“ im Dienstleistungsbereich beschäftigten sich weitere Plenary-Sessions und Panel-Discussions mit Status-Berichten und Erfahrungen verschiedener teilnehmender Institutionen (z.Bsp. NASA, Motorola Inc.) im Bereich Robotik und Fertigungsautomation.

Symposium on Robot Control - SY.RO.CO'94

Capri, 19.-21. September 1994

P. Kopacek

Das Symposium über Steuerung und Regelung von Industrierobotern wurde unter der Schirmherrschaft der IFAC das erste Mal 1985 in Barcelona abgehalten. Ziel war es Probleme, die im Zusammenhang mit der Steuerung und Regelung von Industrierobotern auftraten sowohl wissenschaftlich als auch praxisorientiert zu behandeln. Dazu gehörten Kinematik und Kinetik, fortgeschrittene Regelalgorithmen, Sensorsysteme u.ä. mehr. Nach Karlsruhe 1988 und Wien 1991 fand gemäß dem 3-Jahres Zyklus das vierte dieses Jahr in Capri statt.

Die 164 Teilnehmer kamen überwiegend aus dem universitären Bereich, was sich auch in den Vorträgen niederschlug. Es wurde kaum über praktische Anwendungen berichtet. Es dominierten Beiträge über Steuerung und Regelung flexibler Roboter, über mobile Roboter und deren Navigation sowie über Greifer oder Endeffektoren. Weitere Themen waren die koordinierte Zusammenarbeit mehrerer Roboter, Weltraum- und Unterwasserroboter sowie die Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz zur Steuerung und Regelung von Industrierobotern traten Fuzzykonzepte sowie neuronale Netze in den Hintergrund - es wurden lediglich zwei Beiträge präsentiert. Der Grund liegt wahrscheinlich darin, daß diese Methoden nur für hoch nichtlineare Systeme erforderlich sind. Die derzeitigen kommerziell verfügbaren Industrierobotern können mit hinreichender Näherung als lineare Systeme aufgefaßt werden.

Im Vergleich zu den anderen Robotergrößenveranstaltungen dieses Jahres der IEEE Robotics Konferenz in San Diego und der ISIR in Hannover waren die Serviceroboter kein wirkliches Vortragsthema.

In drei Surveypapers wurde versucht einen State of the Art über Steuerung und Regelung von Robotern, Weltraumroboter sowie integrierte Steuerung und Bewegungsplanung von Industrierobotern zu geben. Auffallend dabei war, daß die Vortragenden überwiegend Forschungsergebnisse aus ihren Instituten präsentierten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß zukünftig weitere Fortschritte in der Steuerung und Regelung durch die Verfügbarkeit von industriellen Sensoren geprägt sein wird.

The EPAC'94 Meeting
at Wageningen University for Agriculture
September 26 and 27, 1994

A short report by A. Weinmann

The meeting of European Professors of Automatic Control 1994 (EPAC'94) was devoted to several topics in education, both undergraduate and graduate, in methodology, cooperation and interdisciplinary activities.

An interesting idea is the behavioural approach in studying dynamical systems, augmenting or replacing the input-state-output view of investigating dynamical systems. Signal flow diagrams are not always adequate, e.g. analyzing a door-closing-apparatus. The behavioural approach is a new axiomatic way, a new philosophical aspect considering the interconnection between variables (J.C. Willems). This approach is more similar to the holistic way of studying chemical engineering problems and discrete-event systems than to the signal flow approach as used in mechanical and chemical engineering.

Alternative models in tracking time-variant system parameters (J. Stecha) and alternative schemes in describing the effects of unknown amount of noise (R.P. Guidorzi) lead to new and better results.

Model predictive control offers a new paradigm dealing multivariable systems with constraints, including robust and global stability and optimization (M. Morari).

Much attention is again paid to nonlinear control problems and its satisfactory results even in the case of neglecting a complete dynamical model of the plant (D.P. Atherton).

Integrated system optimization and parameter estimation allows for designing control systems including uncertainties and model-reality differences (P.D. Roberts).

Repetitive forecasting and optimization has proven satisfactorily operating with complex environmental and distribution systems (K. Malinowski).

Interesting cooperation projects were also presented: The Dutch Graduate School, The Teaching Company Scheme in the UK, a MATLAB package for teaching control engineering from a point of view of increased motivation, and the SHARE equipment reuse.

Zur Problematik der Offline-Programmerstellung Meßablauf-Simulation und Kollisions-Überwachung in der rechnergestützten Koordinatenmeßtechnik

H. R. Mansouri

Begutachter: Univ. Prof Dr. P. H. Osanna und Univ. Prof Dr. P. Kopacek

Das Koordinatenmeßgerät (KMG) mit Rechnersteuerung, Steuer- und Auswertesoftware ist heute zum wesentlichen Bestandteil der Qualitätssicherung geworden. Die Rolle des KMG für die Qualitätssicherung ist ähnlich wie die der NC-Maschine für die Fertigung. Mit Hilfe von Koordinatenmeßgeräten kann man Werkstücke bis zu etwa 400 m³ Meßvolumen und maximalen Meßlängen bis 25 m mit einer Auflösung von 1 bis 0,1 µm messen.

Die dafür notwendigen Meßprogramme werden künftig nicht mehr am Gerät sondern fern vom Gerät - am grafischen Bildschirm - erstellt. Dies ist ein bedeutender Faktor zur Reduzierung der Meßzeiten um bis zu 85 %. Bei der Erstellung von fehlerfreien, gerätefernen Programmen hilft eine grafische Simulation, besonders, wenn diese in 3D stattfindet. Eventuelle Kollisionen lassen sich durch grafische und mathematische Methoden überprüfen. Das so erzeugte Programm wird in Form von NDF (neutrale Datenfile) generiert (DMIS). In weiterer Folge wird es über einen Postprozessor in die Form der gerätespezifischen Steuerdaten umgewandelt.

Im Hinblick auf die geräteferne Programmierung wurde im Rahmen der Dissertation ein grafikunterstütztes Programmpaket "CAQ" für die Simulation von Meßabläufen sowie die Generierung von CNC-Programmen zur Durchführung automatisierter Meßabläufe auf einem KMG entwickelt. Das Programm wurde in der Programmiersprache Turbo Pascal 6.0 geschrieben und läuft unter dem DOS-System mit einer VGA-Karte.

In der Arbeit wurde, ausgehend von der Beschreibung der Grundlagen der Koordinatenmeßtechnik, ein Überblick über die Programmiermethoden für KMG gegeben. Weiters wurde die universell einsetzbare Programmiersprache DMIS, die der bidirektionalen Kommunikation von Fertigungs- und Meßeinrichtungen dient, erläutert. Außerdem wurde ein Überblick über graphische Simulation und Kollisionsbetrachtungen gegeben. Der letzte Teil der Arbeit umfaßt die Beschreibung des grafikunterstützten Programmpaketes "CAQ" für die Simulation von Meßabläufen sowie die Generierung von CNC-Programmen zur Durchführung automatisierter Meßabläufe auf einem Koordinatenmeßgerät.

Methodologie, Konzeption und Auslegung von Systemen zum Wechsel von Tastern und Werkstücken zur Integration von CAQ im Rahmen moderner Produktion

Erdal Sargiül

Begutachter: Univ. Prof. Dr. P.H. Osanna und Univ. Prof. Dr. P. Kopacek

Die vollständige koordinatenmeßtechnische Erfassung komplexer Werkstückgeometrien setzt zum Antasten aller notwendigen Meßpunkte an der Werkstückoberfläche den Einsatz unterschiedlicher Taststiftkombinationen voraus. Um den Austausch von Tastern automatisch durchführen zu können, besteht die Möglichkeit, Koordinatenmeßgeräte, die sich mit ihrer hohen Genauigkeit und universellen Einsetzbarkeit für die flexible, fertigungsbegleitende Qualitätsprüfung anbieten, mit Tasterwechseinrichtungen (TWE) auszurüsten.

Diese Einrichtungen verändern grundlegend die Handhabung und den Einsatz dieser Meßgeräte; sie sind ein wesentlicher Schritt in Richtung fertigungsnaher Qualitätssicherung und Rationalisierung mit Hilfe der Mehrkoordinatenmeßtechnik. Die Steigerung der Effizienz von Koordinatenmeßgeräten gilt sowohl für Tasterwechseinrichtungen mit manueller Betätigung als auch für den vollautomatischen Betrieb zusammen mit einem Tastermagazin (TM).

Die Einbindung eines Koordinatenmeßgerätes mit Taster- und Werkstückwechseinrichtungen (TWE- und WWE) in die flexible Fertigung ermöglicht, daß die Rüst- und Nebenzeiten, und damit auch die Reaktionszeiten zwischen Qualitätsinformationen und Fertigung, verkürzt werden. Bei der Einbindung der Koordinatenmeßtechnik in die flexibel automatisierte Fertigung ist man bestrebt, möglichst alle koordinatenmeßtechnische Tätigkeiten durch automatisierte Einrichtungen erledigen zu lassen. Ein komplexes Steuer- und Regelsystem ist dazu notwendig, das sich schnell und einfach an die jeweilige Aufgabe anpassen läßt. Als Lösungsvarianten dieser Automatisierungsaufgabe werden verschiedene Vorschläge im Kapitel 5 konzipiert und entwickelt, wobei im einzelnen vor allem auf den Aufbau und die Struktur von Tasterwechseinrichtungen, Tastermagazinen, Werkstückwechseinrichtungen und Steuerungen sowie auf die zugehörigen Programmierverfahren und -systeme eingegangen wird.

Im Rahmen dieser Dissertation, ausgeführt an der Abteilung Austauschbau und Meßtechnik des Instituts für Fertigungstechnik der Technischen Universität Wien, wurde eine Tasterwechseinrichtung mit einem entsprechenden Tastermagazin zur Erhöhung der Flexibilität und Effizienz sowie zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit eines Koordinatenmeßgerätes in Ständerbauart entwickelt. Die Gesamtmeßzeit beim Einsatz dieser Tasterwechseinrichtung kann, etwa bei einer Zylinderkopf-Messung in CNC-Betrieb, um bis zu 45 % verkürzt werden, dies ist ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit. Weiters ist es durch diese Einrichtung möglich, Koordinatenmeßgeräte, die heute in vielen Fällen als alleinstehende Geräte im Einsatz sind, zu flexiblen automatischen Meßzentren auszubauen und damit in die flexible Fertigung zu integrieren.

Algebraische Behandlung von Reglerentwurfsmethoden im Zustandsraum mit H_∞ Kriterien

Franz Wolfgang Lexa

Begutachter: Univ.Prof. Dr. H. P. Jörgl und Univ.Prof. Dr. P. Kopacek

Als Einleitung wird die Verwendung der H_∞ -Norm physikalisch motiviert. Es wird gezeigt, daß sie, als Performancekriterium verwendet, einer Minimierung oder Beschränkung der maximalen Amplitudenerhöhung entspricht. Es erfolgt also ein Entwurf für ein Worst-Case-Szenario. Darüber hinaus kann sie als notwendige und hinreichende Stabilitätsbedingung einer Klasse von Systemen verwendet werden.

Als wesentliches mathematisches Hilfsmittel für die Beweisführung der Entwurfsmethoden und beim Entwurf selber werden algebraische (ARE) und -ungleichungen (ARI) verwendet. Dementsprechend ist der Behandlung ihrer Eigenschaftungen breiter Raum gewidmet. Als Klassifizierungsmerkmal wird die Definitheit des quadratischen Terms verwendet. Während AREs mit semidefinitem quadratischen Term aus der klassischen Optimierung und Faktorisierung wohlbekannt sind und Resultate über ihre Eigenschaften Legion sind, werden im Rahmen dieser Arbeit solche mit indefinitem quadratischen Term benötigt. Es wird ein Verfahren zur Lösung der entsprechenden ARI angegeben, das unter relativ milden Annahmen auch notwendige Bedingungen zur Verfügung stellt.

Die Beschreibung der nominalen Systeme wird auf lineare, zeitunabhängige Mehrgrößensysteme beschränkt. Als Regelkreisstruktur wird ein einschleifiger Regelkreis verwendet, der durch eine linear fraktionale Transformation (LFT) repräsentiert wird. Von einer Parametrisierung aller stabilisierenden Regler für derartige Systeme ausgehend, wird gezeigt, daß der Entwurf suboptimaler H_∞ -Regler für reguläre Strecken einem Abstandsproblem, in dem eine stabile Übertragungsmatrix gesucht ist, die die geringste Distanz - im Sinne der H_∞ -Norm - zu einem antistabilen System hat, ident ist. Die Lösung des Abstandsproblems wird mit Hilfe einer Allpaßeinbettung gefunden. Es wird gezeigt, daß die daraus resultierenden zentralen supoptimalen Regler die Struktur eines Zustandsreglers mit Beobachter und zusätzlicher Schätzung der externen Signale haben.

Bei der Modellierung von Strecke, Regler und Modellunsicherheit als LFT kann durch die Beschränkung der H_∞ -Norm des resultierenden nominalen geschlossenen Kreises robuste Stabilität und nominale Performance, jedoch nicht robuste Performance garantiert werden. Um diese zu erreichen werden zwei Methoden demonstriert. Zum einen kann durch eine bilineare Transformation zusätzlich zur H_∞ -Normbeschränkung ein Polgebiet - entweder Kreise oder Halbebenen in der linken Halbebene - vorgegeben werden, zum anderen können für Systeme mit Parameterunsicherheit robuste Zustandsregler gefunden werden.

Da physikalische Systeme im allgemeinen nicht regulär modelliert werden können, wird eine Reihe von Transformationen vorgestellt, die invariant gegenüber der H_∞ -Norm der LFT sind und mit denen das System regularisiert werden kann.

Abschließend wird anhand eines einfachen Anwendungsbeispiels die Implementierung der vorgestellten Methoden demonstriert. Es wird gezeigt, daß mit geringem Aufwand, gemessen an der Komplexität des benötigten Algorithmus, der Komplexität des Reglers und der notwendigen Feinabstimmung der Entwurfsparameter, durchaus zufriedenstellende Resultate erreicht werden können.

Es wird gezeigt, daß die mathematischen Voraussetzungen zum Verständnis der Theorie gering gehalten werden können, wenn im Gegensatz zur herkömmlichen Literatur auf allzu große Prägnanz und in herkömmlichen Anwendungen ohnehin nicht benötigte Allgemeinheit verzichtet wird.

Steuerungsalgorithmen zur Vermeidung von Kollisionen der Glieder redundanter Roboter mit Hindernissen

N. Rahmanian-Shahri

Begutachter: Univ.Prof. Dr. I. Troch und Univ.Prof. Dr. K. Desoyer

Roboter, die mehr als die minimal notwendige Anzahl von Freiheitsgraden besitzen, die sie benötigen, um ihre Aufgabe zu erfüllen, bezeichnet man als redundante Roboter. Aufgrund der Redundanz des Roboters bleiben einige Freiheitsgrade unbestimmt, wenn nur die Bahn und die Geschwindigkeit für den Greifermittelpunkt vorgegeben werden. Diese Freiheitsgrade können durch verschiedene Kriterien festgelegt werden, aber auch durch Einschränkungen, die durch die Gefahr einer Kollision gegeben sind. In dieser Arbeit wurden ein Verfahren zur Kollisionserkennung und 3 Steuerungsalgorithmen zur Vermeidung von Kollisionen der Glieder redundanter Roboter mit Hindernissen entwickelt. Bei der Kollisionserkennungsmethode werden nur die Positionen der Roboterelenke im Arbeitsraum herangezogen. Dies kann den Rechenaufwand wesentlich verringern, da die Positionen der Roboterelenke im Arbeitsraum bei jeder Position der Roboterhand sehr einfach aus den Gelenksvariablen berechnet werden können. Die Hindernisse, die als konvexe Volumina im Arbeitsraum dargestellt sind, wurden dabei mit Grenzellipsen (in 2D) umhüllt. Bezüglich jedes Robotergliedes wurde für jedes Hindernis eine Grenzellipse festgelegt. Wenn die Roboterelenke außerhalb dieser Grenzellipsen liegen, werden keine Kollisionen der Roboterglieder mit Hindernissen entstehen. Auf Basis dieser Grenzellipsengleichungen wurde eine Optimierungsmethode zur Kollisionsvermeidung entwickelt. Zur Vermeidung von Kollisionen wurden dabei die von den erhaltenen Gelenksstellungen abhängigen Funktionen mit Gradientensuchverfahren maximiert. Durch Einfügen von zusätzlichen Gleichungen wurde ein kollisionsvermeidender Steuerungsalgorithmus unter Erweiterung des Systems entwickelt. Die zusätzlichen Gleichungen beinhalten jeweils eine neue Variable zusätzlich zur Gelenksvariablen des Roboters. Aufgrund der unterschiedlichen Dimensionen der Gelenksvariablen und der zusätzlichen Variablen werden die zu minimierenden Anteile bei der Bildung der pseudoinversen Lösung unterschiedlich gewichtet. Bei günstiger Wahl der Anfangswerte der zusätzlichen Variablen können diese Gewichtungen und damit die Gelenksgeschwindigkeiten zur Kollisionsvermeidung beeinflusst werden. Die Wahl der Anfangswerte erfolgt dabei off-line mit Hilfe der Simulation. Durch Rekonfiguration mittels Steuerung des Selbstbewegungsanteils wurde eine Methode zur on-line Kollisionsvermeidung entwickelt. Sobald sich eines der Roboterglieder in Kollisionsgefahr mit einem Hindernis befindet, wird durch diesen Algorithmus festgestellt, wie der Roboter ausweichen muß, um die Gefahr zu vermeiden. Die Methoden wurden dabei an Hand von theoretischen Überlegungen und Simulationen untersucht.

Schnittstellensoftware für PCs

Tips für Anwender und Programmierer, alles über Gerätetreiber, Programm-Routinen; PD-Software auf Diskette

Michael Thieser

320 Seiten, 58 Abbildungen und 67 Tabellen

Franzis-Verlag GmbH 1994, 85586 Poing

Dieses Buch behandelt die speziellen Probleme der Schnittstellenhandhabung bei PCs. Jeder PC ist heute mit Standardschnittstellen wie Tastatur, Maus, Joystick, Druckerport und seriellem Interface versehen. Manchmal wird auch eine SCSI-Bus-Schnittstelle eingesetzt. Alle diese hardwarenahen Schnittstellen werden hier in den einzelnen Kapiteln behandelt. Besonderes Augenmerk wird dabei vor allem auf die Softwareerstellung gelegt, weil bei der Programmierung der Schnittstellen neben den Eigenheiten der verwendeten Programmiersprachen auch noch die Belange der Schnittstellenhardware berücksichtigt werden müssen. Um der Problematik der Hardwareprogrammierung gerecht zu werden, wird dem Leser in vielen kleinen praktischen Beispielen ein Einblick in die verschiedenen Möglichkeiten gegeben. Positiv fällt auch die beigelegte Diskette auf, die begleitend zu den einzelnen Kapiteln des Buches die Beispiele in ausführbarer Form enthält. Für C-Programmierer ist auch eine Bibliothek von verschiedenen Funktionen beigelegt, die in eigenen Programmen Verwendung finden können.

Das Buch beginnt mit einer allgemeinen Einleitung über die Verwendung, Bedeutung und Programmierung von Gerätetreibern, Interrupts und DMA-Zugriff. Ein sehr ausführliches Kapitel widmet sich der seriellen Schnittstelle sowohl unter DOS als auch unter WINDOWS. Es werden die Übertragungsprotokolle für DFÜ vorgestellt sowie die Programmierung und Einstellungen der RS232-Schnittstelle. Als Abschluß dieses Kapitels werden zwei public-domain Programme vorgestellt, die auch auf der Diskette vorhanden sind. *MikroLink* ist ein DFÜ-Programm unter WINDOWS und *ComWatch* ein Überwachungsprogramm für Schnittstellen unter DOS.

Das nächste Kapitel gibt einen guten Überblick über die Handhabung, Programmierung und Bedeutung der Centronics-Schnittstelle ebenfalls sowohl unter DOS als auch unter WINDOWS. Den Abschluß bildet hier das public-domain Programm *Mininet*, das ein simples Netzwerk über den Druckerport ermöglicht. Das vierte Kapitel beschreibt den SCSI-Bus sowie das ASPI-Protokoll (Advanced SCSI Programming Interface), das für die Ansteuerung und Kommunikation mit den angeschlossenen Geräten Verwendung findet.

Die nächsten beiden Kapitel beschreiben die Schnittstellen für die häufigsten Eingabegeräte eines PC, nämlich die Tastatur und die Maus. Für die Verwendung der Tastatur werden die Gerätetreiber samt ihren Funktionen sowie die direkte Hardwareprogrammierung beschrieben. Die Handhabung und Programmierung der Maus auf der DOS-Ebene wird an Hand des Gerätetreibers MOUSE.SYS beschrieben. Weiters werden die vielfältigen Einstellmöglichkeiten unter WINDOWS behandelt. Im letzten Kapitel wird die Wirkungsweise und Programmierung des Gameport abgehandelt, und dabei festgestellt, daß dieser nicht nur für Spiele sondern auch für einen einfache Dateneingang interessant ist. Den Abschluß dieses Buches bildet eine Zusammenfassung der Bedeutung und Adressierung der einzelnen Hardwareregister.

Das vorliegende Buch stellt einerseits ein ideales Nachschlagewerk für in der Praxis stehende Techniker dar und bietet andererseits dem Neuling einen guten und durch Beispiele leicht nachvollziehbaren Einstieg in die Schnittstellenproblematik bei Pcs.

R.Probst

Robotics in Alpe-Adria Region

P. Kopacek, editor

133 figures, 230 pages
Springer-Verlag Wien, 1994,

This book summarizes the proceedings of the 2nd International Workshop on Robotics in Alpe-Adria Region, held in Krems 1993. It is organized in ten chapters about special issues of robotics. Chapter 1 consists of four surveys about robotic research activities in Alpe-Adria region. It considers not only robotic activities in industry, but also gives a closer look to research projects at university institutes. The first survey is written by the editor himself. It introduces the reader to several institutes in Austria dealing with robotics research, e.g. the Department of Mechanical Engineering of the University of Technology of Vienna or the Institute of „Mechanics“ of the Technical University Graz. Detailed information is given about founding dates and current projects these institutes are conducting. Furthermore, it gives a brief statistical overview about the influence of robotics in industrial environments of Austria since 1989. The second survey gives a more detailed look at the initiative of constituting an Alpe-Adria research centre for robotics and automation. It is planned to integrate research, development and educational laboratories in this region. The third survey deals with advanced control concepts for industrial robots like fuzzy control. The last survey of chapter 1 gives a detailed overview about an european joint initiative for improvement in automation and control technology.

Chapter 2 introduces special institutes of the Alpe-Adria region. First, the activities at the RISC in Linz are described. Selected research topics and applications like *Gröbner bases for computing inverse kinematics*, *path planning for non-synchronized motions* or *Roider methods for collision detection* are presented. Next, the Institute of Industrial Technologies and Automation of the National Research Council of Italy is introduced. The reader gets

exhaustive information about foundation, goals and research activities. Last, different research topics of the Scientific Academy of Lower Austria are briefly presented.

Chapter 3 is devoted to robot kinematics and kinetics. Here, the reader gets information about robot wrist configurations and mechanisms or the parallel evaluation of kinematic transformations as well as about robot arm modelling and control or the dynamic model of a mobile robot.

Chapter 4 is a summary of papers about construction, design and simulation of robots. It covers a wide area of research topics such as the construction of light weight robots, modular robots or the 3D simulation system USIS, which integrates a laser scanner or CCD-camera sensor.

In chapter 5, several robot control methods are presented. An experimental multiprocessor robot controller is described as well as a pc-based low cost controller. On the other hand, results in control schemes, like a robust adaptive Lyapunov-based robot control, or the stability of a hybrid position/force control are introduced to the reader.

Chapter 6 deals with sensors and mobile robots. It contains papers about three dimensional object recognition, multi-sensor techniques for assembly robots or commanding robots by voice. Information can also be obtained about special leg mechanisms or mobile robots for semi-structured environments.

Chapter 7 considers some applications in robot technology. It deals e.g. with methods for tube welding, CAD systems for workcells design and low cost coupling CAD/CAM applications of artificial intelligence for robot assembly.

Chapter 8 gives an overview about robots in manufacturing systems like scheduling in flexible manufacturing systems. Another topic of this chapter is the computer aided planning of assembly systems or an user-friendly software tool for designing those cells.

Chapter 9 is dedicated to the problem of testing robots. It deals not only with testing industrial robots itself, but also considers measuring systems and quality assurance. A closer look is taken to low cost developments in this sector.

Chapter 10 handles various aspects of robotics. Besides a modular parallel gripper system, it gives a brief introduction to robotics in transportation systems. As a whole, this book represents a wide area of research topics and activities in Alpe-Adria region. Especially, with the chapters 1&2 about research organizations in this region, the reader gets a detailed overview about institutes, research centres, current projects and developments.

Apparently, this book is not meant as a textbook. It summarizes the proceedings of the 2nd international workshop RAA'93. Nevertheless, it serves as a fine reference to those, who are involved in robotics research and who are interested in the activities or institutes in this region.

Grundlagen elektrischer Maschinen

Germar Müller

VCH Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo 1994
594 Seiten. 526 Abbildungen. 32 Tabellen.

Dieses seit Jahren bewährte Lehrbuch für Studenten der Fachrichtung Elektrotechnik liefert eine in sich geschlossene Einführung in die Grundlagen elektrischer Maschinen. In klar gegliederten Hauptabschnitten werden Transformatoren, Gleichstrommaschinen, Dreiphasen-Asynchronmaschinen, Dreiphasen-Synchronmaschinen sowie grundlegende Ausführungen von Einphasen-Wechselstrommaschinen umfassend behandelt. In jedem Abschnitt werden zuerst die Grundlagen und allgemeine Gesetzmäßigkeiten besprochen und im nächsten Schritt die technischen und konstruktiven Merkmale der vorgestellten elektrischen Maschine analysiert. Das vorliegende Lehrbuch bildet den Auftakt der Reihe "Elektrische Maschinen", dem sich die Bände "Theorie elektrischer Maschinen" und "Berechnung elektrischer Maschinen" anschließen.

P. Kopacek

Ein Institut stellt sich vor:

Institut für Maschinen- und Prozeßautomatisierung der Fakultät Maschinenbau an der TU Wien

H. P. Jörgl

Das Institut für Maschinen- und Prozeßautomatisierung wurde 1984 an der Fakultät Maschinenbau gegründet. Das Institut befindet sich im 5. Stock des neuen elektrotechnischen Institutgebäudes. Der derzeitige Personalstand setzt sich aus 1 ordentlichen Universitätsprofessor, 3 Universitätsassistenten, 3 Vertragsassistenten, 1,5 technischen Bediensteten (HTL) und einer Sekretärin zusammen. Aus Gründen der räumlichen Beschränktheit, die gesamte Institutsfläche beträgt ca. 200 m², ist an eine personelle Instituterweiterung derzeit nicht zu denken.

In der Lehre betreut das Institut die drei Studienrichtungen der Fakultät Maschinenbau, nämlich Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Wirtschaftsingenieur-Maschinenbau mit Pflichtvorlesungen, Rechenübungen, Laborübungen, Seminaren und Diplomarbeiten auf den Gebieten der Regelungs- und Steuerungstechnik. Daneben werden eine Reihe von Wahllehrveranstaltungen auf den Gebieten Modellbildung dynamischer Systeme, adaptive und prädiktive Regelung sowie Prozeßrechnersteuerung angeboten. Das Bildungsziel ist dabei die Einführung der Studierenden der oben genannten Studienrichtungen in die konventionellen und modernen Methoden der Regelungs- und Steuerungstechnik. Im Durchschnitt werden jährlich ca. 12 Diplomarbeiten betreut, wobei auf eine möglichst starke Industrienähe Wert gelegt wird.

Forschungsaktivitäten des IMPA:

Identifikation und Regelung nichtlinearer Prozesse

Dem Entwurf nichtlinearer Algorithmen zur Regelung nichtlinearer Prozesse kommt eine immer größer werdende Bedeutung zu. Es werden dabei in erster Linie Netzwerke radialer Basisfunktionen, aber auch "Künstliche Neuronale Netzwerk"-Methoden, die sich auf den sogenannten Backpropagation Algorithmus stützen, zur Identifikation als auch zur Realisierung nichtlinearer Regler verwendet. Einen weiteren vielversprechenden Ansatz zur Identifikation nichtlinearer Systeme stellt die sogenannte Wavelet-Transformation dar, deren Einsatz ebenfalls ein Teilbereich dieses Forschungsgebietes ist. Desweiteren wird an der Entwicklung signalbasierter adaptiver Regelalgorithmen gearbeitet. Die Anwendungen auf diesem Gebiet liegen vornehmlich in der verfahrenstechnischen Industrie im weitesten Sinne.

Automatisierung der Herstellung von Beton- und Ziegelmauer-Fertigteilen

Bei der Herstellung von Beton- und Ziegelmauer-Fertigteilen war der Automatisierungsgrad bislang eher bescheiden. Neben lohnenden steuerungstechnischen Aufgabenstellungen, die es zu bearbeiten gilt, werden in diesem Forschungsbereich vor allem der Einsatz von Fuzzy-Regelungskonzepten bei der Beton- bzw. Mörtelbereitung und deren Aufbringung untersucht. Es ist dies ein ausgesprochen anwendungsbezogenes Forschungs- und Entwicklungsgebiet, bei dem immer die einsatzbereite Maschinen das Ziel darstellt.

Regelung pneumatischer Linearantriebe

In diesem Forschungsbereich wird die Positionsregelung schneller pneumatischer Linearantriebe mittels nichtlinearer Regelalgorithmen untersucht. Es kommen dabei nichtlineare Zustandsregler zum Einsatz, die eine möglichst genaue und schnelle Positionierung über den gesamten Arbeitsbereich des Antriebs erlauben.

Beratungssystem zur Prozeßidentifikation und Regelung

Derzeit existieren zahlreiche kommerziell erhältliche Programmpakete zur Prozeßidentifikation und für den Entwurf linearer Regler. Der unerfahrene Benutzer derartiger Software steht jedoch in vielen Fällen diesen sehr komplexen Entwurfswerkzeugen hilflos gegenüber. Das Beratungssystem soll den Benutzer ausgehend vom Entwurf des Identifikationsexperiments bis hin zum Entwurf eines geeigneten Reglers unterstützen. dabei werden die Vorgänge "Identifikation" und "Reglerentwurf" objektorientiert formal dargestellt und so dann in der operationellen Phase interaktiv abgearbeitet.

Schwingungsregelung von selbsterregten Rotoren durch aktive Magnetlager

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Maschinendynamik und Meßtechnik der TU-Wien wird in diesem gerade anlaufenden Forschungsprojekt ein adaptiver Regler zur automatischen Unterdrückung von inhärent selbsterregten Rotorschwingungen entwickelt.

Laufende Industriekooperationen:

Regelungsprobleme in Walzwerken, Regelung und Steuerung in Heizungs- Lüftungs- und Klima-Anlagen im Zusammenspiel mit Lichtsteuerungsaufgaben (Anwendung von Fuzzy-Konzepten bei der Storen-Regelung), Positionsregelung eines auf einem Satellit montierten Teleskops.

Publikationen der Institutsmitglieder:

Die Zeitschriftenveröffentlichungen, Vorträge, Konferenzbeiträge der Institutsmitglieder in den vergangenen 5 Jahren sind dem demnächst erscheinenden Institutsbericht 1990/1994 zu entnehmen. 1993 und 1994 wurden 2 Bücher des Berichterstatters, nämlich das Repetitorium der Regelungstechnik Band 1 und 2 veröffentlicht. Darin werden die Grundlagen der Regelungstechnik aus maschinenbaulicher Sicht anhand zahlreicher Beispiele und Aufgaben mit Lösungen dargestellt.

INTERKAMA 95

Die weltweit führende Fachmesse für Meß- und Automatisierungstechnik INTERKAMA 95, die vom 30. Oktober bis 4. November 1995 in Düsseldorf stattfindet, tritt mit einigen konzeptionellen Änderungen an. Der Bereich Fertigungstechnik wurde komplett ausgegliedert, so daß die INTERKAMA 95 nach wie vor eine lupenreine Fachmesse für die Verfahrenstechnik darstellt.

Schwerpunkte sind Leit- und Überwachungssysteme, Sensoren, Meß- und Prüftechnik, Wägetechnik, Mikroskopie, Stellgeräte, Aktoren, Steuerungs- und Regelungstechnik, Kommunikation, Bauteile, Zubehör, Werkzeuge und Prüfeinrichtungen, Eingabe- und Ausgabegeräte, Konfigurierung und Anwendungssoftware sowie Dienstleistungen. Fokussiert werden außerdem insbesondere die Angebotsbereiche "Antriebstechnik für die verfahrenstechnische Seite", "Elektrotechnik für die Elektronik" und "Datenverarbeitung für die Qualitätssicherung sowie für Prozeß- und Produktionsleitsysteme".

Auch die INTERKAMA 95 wird von zahlreichen Rahmenveranstaltungen begleitet, die Besuchern das technische Know-how der Zukunft, aber auch praxisnahes Wissen vermitteln sollen. Dazu zählen Aussteller-Seminare, der Technologiemarkt "Angewandte Forschung" sowie technische Konferenzen, die von der GMA - Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik - durchgeführt werden.

Hauptbesucherzielgruppen der INTERKAMA sind Experten aus Grundstoffindustrien, Prozeßindustrien, aus dem Energiesektor sowie die dazugehörigen Ausrüster und Dienstleister.

Zur vergangenen INTERKAMA kamen rund 90.000 Fachbesucher aus 63 Ländern, denen 1.537 Aussteller aus 27 Ländern gegenüberstanden und eine Fläche von rund 70.000 m² belegten. Die INTERKAMA ist somit die größte Fachmesse der Branche weltweit.

<i>Datum</i>	<i>Veranstaltung</i>	<i>Ort</i>	<i>Weitere Informationen erhältlich bei:</i>
11.10.-13.10.94	ASIM 94: Symposium Simulationstechnik	<i>Stuttgart</i>	Martin Kraus, FHTE Flandernstr. 101, D-73732 Esslingen FAX: (+49) 711-397-3763
20.10.94	Österreichischer Automatisierungstag	<i>Wien</i>	Institut für Handhabungsgeräte u. Robotertechnik Floragasse 7a, 1040 Wien Tel.: 0222/504 18 35, FAX: 0222/504 18 35 9 Email: e318@ihrt1.ihrt.tuwien.ac.at
2.11.-4.11.94	4. Int. Symposium für Informationswissenschaft ISI 94	<i>Graz</i>	Insitut für Informationswissenschaft Karl Franzens Universität Graz Strassoldogasse 10, 8010 Graz Tel.: 0316/380-3560, FAX: 0316/381413 Email: isi@edvz.kfunigraz.ac.at
6.11.-9.11.94	6th IEEE Int'l Conf. on Tools with Artificial Intelligence	<i>New Orleans LA, USA</i>	Jeffrey J.P. Tsai, Dept. of EECS (M/C 154), 851 S. Morgan Street, Univ. of Illinois Chicago, IL 60607 7053, USA. Tel.: (+1) 312 996 9324, FAX: (+1) 312 413 0024 Email: tsai@cs.tulane.edu
8.11.-11.11.94	3rd Int'l Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision (ICARCV'94): Intelligent Automation	<i>Singapore SGP</i>	Prof. N. Sundararajan, c/o ICARCV '94 Conf. Secretariat, Institution of Engineers, Singapore 70 Bukit Tinggi Road, Singapore 1128 Tel.: (+65) 469 5000, FAX: (+65) 467 1108 Email: ensundara@ntuvax.ntu.ac.sg
15.11.-16.11.94	IFAC Workshop Trends in Hydraulics and Pneumatic Components and Systems	<i>Chicago, IL, USA</i>	Prof. David N. Wormley Pennsylvania State University University Park, PA 16802, USA FAX: (+1) 814 863-4749 Email: dnw@oas.psu.edu
20.11.-24.11.94	Int'l Symp. on Information Theory and Its Applications 1994 (ISITA '94)	<i>Sydney, AUS</i>	The Convention Manager, ISITA '94 AE Conventions Pty Limited, PO Box E181 Queen Victoria Terrace, ACT 2600 Australia Tel.: (+61) 6 270 6520, FAX: (+61) 6 273 2012
12.12.-14.12.94	IFAC Workshop on Safety, Reliability and Applications of Emerging Int. Contr. Technologies	<i>Hong Kong</i>	Dr. C.W. Chan, Dept. of Mech. Engg., University of Hong Kong Pokfulam Road, Hong Kong FAX: (+852) 859-7906

12.12.-14.12.94	INRIA/IFIP/IFAC Workshop Integrated Manufacturing Systems Engineering - IMSE'94	<i>Grenoble, F</i>	Dr. Francois Vernadat, INRIA/Rhone-Alpes, 46 Avenue F. Viallet F-38031 Grenoble, France FAX: (+33) 76574793 Email: francois.vernadat@inria.fr
3.1.-6.1.95	28th Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences (HICSS-28)	<i>Maui, HI, USA</i>	Pamela S. Harrington Univ. of Hawaii at Manoa, Center for Executive Development, 2404 Maile Way Honolulu, HI 96822, USA. Tel.: (+1) 808 956 7396, FAX: (+1) 808 956 3766 Email: hicss@uhunix.uhcc.hawaii.edu
13.2.-17.2.95	1st World Cong. on Intelligent Manufacturing Processes and Systems (IMP&S)	<i>Mayaguez San Juan, PRI</i>	Prof. Vladimir R., P.O. Box 5000 Univ. of Puerto Rico, Mayaguez Puerto Rico 00681-5000 FAX: (+1) 809 265 3817 Email: v_milacic@rumac.upr.clu.edu
19.2.-22.2.95	11th IEEE Conf. on AI Applications (IEEE CAIA)	<i>Los Angeles, CA, USA</i>	Daniel E. O'Leary 3660 Trousdale Parkway, Univ. of Southern California, Los Angeles, CA 90089-1421, USA. Tel.: (+1) 213 740 4856, FAX: (+1) 213 747 8241 Email: oleary@cwis.usc.edu>
13.3.-17.3.95	IFAC Workshop Advances in Automotive Control	<i>Ascona, CH</i>	Ms. Claudia Wittwer Inst.f. Energietechnik, ETH Zentrum CH-8092 Zurich, Switzerland FAX: (+41) 1/262-5207 Email: guzella@lvv.iet.envt.ethz.ch
20.4.-21.4.95	CIRP/IFAC/IFIP/INNS Workshop on Learning in Intelligent Manufacturing	<i>Budapest, H</i>	Dr. Laszlo Monostori, MTA SZTAKI HAS, POB 63, H-1518 Budapest, Hungary FAX: (+36) 1 1667503
9.5.-12.5.95	IMACS/IFAC Symposium: Mathemat. Modelling and Simulation in Agriculture and Bio- Industries	<i>Brussels, B</i>	M'SABI'95 Symp., c/o Lab. Automatique U.L.B., CP 165 50, av F.D. Roosevelt, B-1050 Brussels, Belgium FAX: (+32) 2 650 2677 Email: labauto@labauto.ulb.ac.be
10.5.-13.5.95	IFAC Workshop Control Applications in Marine Systems CAMS 95	<i>Trond-heim, N</i>	AProf. Thor I. Fossen, CAMS-95 Sec., Dept. of Engg. Cybernetics, Norw. Inst. of Technology N-7034 Trondheim, Norway FAX: (+47) 73594399 e-mail: tif@itk.unit.no

14.5.-17.5.95	IFAC/EFB Intl. Conference Computer Applications in Biotechnology	<i>Garmisch-Partenkirchen</i>	DECHEMA e.V., Att.: Conference Office CAB 6 POB 150104 D-60061 Frankfurt/Main FAX: (+49) 69/7564-201
29.5.-31.5.95	IFAC/IFIP Workshop Artificial Intelligence in Agriculture	<i>Wageningen, NL</i>	Prof. A. Udink ten Cate Agricultural Research Dept. (DLO-NL) Centre de Born, POB 59 NL-6700 AB Wageningen, Netherlands FAX: (+31) 8370/24060
31.5.-2.6.95	IFAC Workshop Algorithms and Architectures for Real-Time Control - AARTC'95	<i>Ostend, B</i>	AARTC '95 c/o BIRA, Desguinlei 214, B-2018 Antwerp Belgium FAX: (+32) 3/2160689 Email: 100045.2621@CompuServe.COM
7.6.-9.6.95	IFAC Symposium (4th) Dynamics and Control of Chemical Reactors, Distillation Columns and Batch Processes, DYCORD '95	<i>Helsingor, DK</i>	DYCORD '95 c/o Danish Automation Society Symbion Science Park Fruebjergvej 3, DK-2100 Copenhagen, DK FAX: (+45) 31205521 Email: symbjeba@inet.uni-c.dk
12.6.-13.6.95	IFAC Workshop On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries	<i>Newcastle UK</i>	Prof. Julian Morris University of Newcastle upon Tyne Dept. of Chemical & Process Engg. Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK FAX: (+44) 912611182 Email: julian.morris@uk.ac.newcastle
12.6.-14.6.95	IFAC Conference (2nd) Intelligent Autonomous Vehicles	<i>Espoo, Finland</i>	IAV '95 Secretariat c/o Finnish Society of Automation, Asemapiikari SF-00520 Helsinki, Finland FAX: (+358) 0/1461650
14.6.-16.6.95	IFAC Symposium Adaptive Systems in Control and Signal Processing - ACASP '95	<i>Budapest, H</i>	Prof. L. Keviczky Computer and Automation Inst., HAS POB 63, H-1518 Budapest, Hungary FAX: (+36) 1 1667503 Email: h10kev@huella.bitnet
21.6.-23.6.95	1995 American Control Conference (in cooperation with IFAC)	<i>Seattle, WA, USA</i>	Prof. M. Tomizuka Dept. of M.E., Univ. of California Berkeley, CA 94720, USA FAX: (+1) 510 643-5599 Email: tomizuka@euler.berkeley.edu

26.6.-28.6.95	IFAC Symposium Nonlinear Control Systems Design NOLCOS '95	<i>Lake Tahoe, CA, USA</i>	Prof. A.J. Krener Dept. of Mathematics, Univ. of California Davis, CA 95616-8633, USA FAX: (+1) 916 752-6635 Email: ajkrener@ucdavis.edu
27.6.-29.6.95	IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium: Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems - MMS '95	<i>Cam- bridge MA, USA</i>	Ms. Veronica Culbert Human Machine Systems Lab. 3-348 MIT, Cambridge, MA 02139, USA FAX: (+1) 617 253-4196 Email: sheridan@mit.edu
2.7.-5.7.95	IFAC/IFIP/IFORS/SEDC Symposium on Modelling and Control of National and Regional Economies	<i>Brisbane, AUS</i>	Convention Manager IFAC '95 POB E181, Queen Victoria Terract ACT 2600, Australia FAX: (+61) 6/2732918
6.7.-8.7.95	RAA'95: International Workshop on Robotics in Alpe-Adria Region	<i>Pörtl- schach</i>	Prof. P. Kopacek Institut für Handhabungsgeräte u. Robotertechnik Floragasse 7a, 1040 Wien Tel.: 0222/504 18 35, FAX: 0222/504 18 35 9 Email: raa95@ihrt1.ihrt.tuwien.ac.at
10.7.-14.7.95	IFIP/IFAC/IFORS Conference (17th) System Modelling and Optimization	<i>Prague, CZ</i>	Dr. J. Dolezal, Inst. of Info. Theory and Automation, UTIA, POB 18 CZ-18208 Prague, Czech Republic FAX: (+42) 2/824755 Email: ifip@utia.cas.cz
11.7.-13.7.95	IFAC/IFORS/IMACS Symposium (7th) Large Scale Systems: Theory and Applications	<i>London, UK</i>	LSS'95 Secretariat, Control Engg. Centre City University, Northampton Square London EC1V 0HB, UK FAX: (+44) 71/477 8568 Email: lss95@city.ac.uk
8.8.-10.8.95	IFAC Conference: Youth Automation YAC '95	<i>Beijing, China</i>	IFAC YAC'95 Secretariat: Mr. Bin Zhang CAST Auto Tech Co Ltd, 22 Baiwanzhuang Street, Beijing 100037, China, P.R. FAX: (+86) 10 8326042
14.8.-16.8.95	IFAC Conference Intelligent Autonomous Control in Aerospace - IACA '95	<i>Beijing, China</i>	IFAC-IACA'95 Secretariat: Prof. Guang-Rui Zou Beijing Inst. of Control Engg. Chinese Academy of Space Technology, POB 2729 Beijing 100080, China, P.R. FAX: (+86) 10 2543110

14.8.-16.8.95	ASME/IEEE/IFAC Intl. Conference Recent Advances in Mechatronics	<i>Istanbul, TR</i>	Prof. Okyay Kaynak Bogazici University, Dept. of EE UNESCO Chair on Mechatronics 80815 Bebek - Istanbul, Turkey FAX: (+90) 212/2575030 Email: kaynak@vs6410.cc.boun.edu.tr
28.8.-30.8.95	11th Int'l Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future	<i>Risaralda, Colombia</i>	Dr. Hrish Bera Universidad Technologica de Pereira Risardala, Colombia FAX: (+57) 63 - 354446
5.9.-8.9.95	1995 European Control Conference (in Ko-operation mit IFAC)	<i>Rome, I</i>	ECC '95 Secretariat D I S, Univ. degli Studi di Roma "La Sapienza" Via Eudossiana 18, I-00184 Rome, Italy FAX: (+39) 6/44/585367 Email: ecc95@itcaspur.caspur.it
13.9.-15.9.95	IFAC Symposium Low Cost Automation	<i>Buenos Aires, ARG</i>	IFAC-LCA'95 Secretariat, AADECA, Eng. A.T. Casucci, Av. Callao 220, 1oB 1022 Buenos Aires, Argentina FAX: (+54) 1/463780
19.9.-20.9.95	IFAC Workshop Human Oriented Design of Advanced Robotic Systems	<i>Wien</i>	Prof. P. Kopacek Institut für Handhabungsgeräte u. Robotertechnik Floragasse 7a, 1040 Wien Tel.: 0222/504 18 35, FAX: 0222/504 18 35 9 Email: dars@ihrt1.ihrt.tuwien.ac.at
25.9.-28.9.95	IFAC Symposium (5th) Automated Systems Based on Human Skills	<i>Berlin</i>	VDI/VDE GMA Graf Recke Str. 84 D-40239 Duesseldorf, Germany FAX: (+49) 211/6214-161
29.9.-1.10.95	IFAC Conference Supplemental Ways for Improving International Stability - SWIIS	<i>Wien</i>	Dr. Alois Frotschnig Institut für Handhabungsgeräte u. Robotertechnik Floragasse 7a, 1040 Wien Tel.: 0222/504 18 35, FAX: 0222/504 18 35 9 Email: swiis@ihrt1.ihrt.tuwien.ac.at
9.10.-11.10.95	IFAC Workshop Motion Control	<i>München</i>	VDI/VDE GMA Graf Recke Str. 84 D-40239 Duesseldorf, Germany FAX: (+49) 211/6214-161
6.12.-8.12.95	IFAC Symposium Control of Power Plants and Power Systems	<i>Cancun, Mexico</i>	Dr. Roberto Canales/SIPOWER'95 Instituto de Investigaciones Electricas AP 475, Cuernavaca, Mor. 62000, Mexico FAX: (+52) 73/189535 Email: Sifac@iievms1.iiecuer.unam.mx