

德国斯普林格出版社

Robotersysteme 1989.05

工业机器人机构和驱动动态运动误差仿真方法

Robotersysteme 5, 69-76 (1989)

Robotersysteme

© Springer-Verlag 1989

Methode zur Robotersimulation unter Berücksichtigung der schwingungsfähigen Mechanik und lagegeregelten Antriebe

G. Pritschow und J. Huan, Stuttgart

Method for simulating the robot path behaviour considering robot dynamics, drive rigidity and the position control system

Abstract. This paper describes a method for simulating the robot path behaviour considering robot dynamics, drive rigidity, backlash and the position control system. The validity of the proposed method has been proved based on a 4-joint robot model. Dynamic path errors and motor torque diagram during motion can be obtained by simulation. The results of the path error and torque analysis are useful to robot parameter, structure and path optimization.

Zusammenfassung. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Simulation des Roboterbahnverhaltens unter Berücksichtigung der Roboterdynamik, Getriebeelastizität, des Getriebe Spiels und der Lageregelung beschrieben und auf der Basis eines Modells für einen vierachsigen Gelenkroboter untersucht. Das Simulationsergebnis erlaubt Aussagen über die dynamischen Bahnabweichungen und Motormomentverläufe bei der Bewegung des Roboters. Die Analyse der Bahnabweichungen und Motormomentverläufe unterstützt die Parameter-, Struktur- und Bahnoptimierung für den Roboter.

1 Einleitung

Die Bewegung eines Roboters entsteht durch eine Überlagerung rotatorischer oder translatorischer Achsbewegungen, die von den Führungsgrößen der entsprechenden Lageregelkreise vorgegeben werden. Aufgrund der Bewegungen treten nichtlineare Kopplungen zwischen Bewegungsachsen durch Coriolis-, Zentrifugalkräfte, Änderung der Gravitationskraft und des Massenträgheitsmoments auf. Diese nichtlinearen Kopplungen beeinflussen als Störgrößen oder Streckenänderungen die Dynamik der einzelnen Lageregelkreise und erzeugen damit Abweichungen von der gewünschten Sollbewegung.

Die Bahngenauigkeit eines Systems läßt sich durch die Auswahl des Regelungsverfahrens, des Antriebs, des Getriebes und die Einstellung der Parameter im Lageregelkreis beeinflussen. Für den Roboterentwickler ist es nun von großem Interesse, wenn Untersuchungen zur Bahnabweichung schon während der Roboter- und Lageregelungsauslegung durch Simulation am Rechner ermittelt werden können. Dafür ist sowohl eine mathematische Beschreibung

der Lageregelungskreise als auch deren Einbindung in die Roboterkinematik mit nachgiebigen massebehafteten Elementen notwendig.

Dieser Aufsatz beschreibt eine Methode zur Robotersimulation, die folgende Einflußgrößen auf das Bahnverzerrungsverhalten berücksichtigt:

- Roboterkinematik mit massebehafteten Gliedern
- Lageregelungsauslegung
- Antriebseigenschaften
- Getriebeeigenschaften (Elastizität, Spiel und Dämpfung)
- Außenkräfte

Die Simulation ist nicht nur für den Konstrukteur, sondern auch für den Anwender von großem Interesse. Er kann bei der off-line Roboterprogrammierung sowohl eine Überprüfung der dynamischen Bahnverzerrungen als auch der geschwindigkeits- und beschleunigungsabhängigen Roboterachsbelastung durchführen. Die Methode soll nun im folgenden am Beispiel eines 4-achsigen Gelenkroboters erläutert werden, sie ist selbstverständlich auch auf mehrachsige Systeme anwendbar.

2 Modellbildung

2.1 Kinematik

Das zur Untersuchung des Verfahrens verwendete Modell eines vierachsigen Gelenkroboters zeigt Bild 1:

- \vec{W} : Werkzeugvektor
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$: Drehwinkel der Achsen
- P_1, P_2, P_3, P_4 : Armposition
- l_1, l_2, l_3, l_4 : Armlänge
- J_1 : konstantes Massenträgheitsmoment auf der Achse 1
- m_2, m_3, m_4 : Punktmassen auf dem Arm 2, 3, 4
- F : Außenkraft

Es wird angenommen, daß sich die Massen von Arm und Gelenk im Endpunkt des Arms konzentrieren.

Die Beziehung zwischen den zu verknüpfenden Gelenken lassen sich über Koordinatentransformationen beschreiben. Die folgenden Koordinatentransformationen des Modells entstehen durch Drehungen um die Z-Achsen:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & C_2 l_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & S_2 l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & C_3 l_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & S_3 l_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & C_4 l_4 \\ S_4 & C_4 & 0 & S_4 l_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_i = \cos \alpha_i, \quad S_i = \sin \alpha_i \quad (1)$$

2.2 Führungsgrößenzeugung

Die zu simulierende Bahn ist im kartesischen Koordinatensystem durch Anfangs- und Zielpunkt sowie Anfangs- und Zielorientierung P_a, P_b, U_a und U_b vorgegeben (Bild 2). Interpolator und Rückwärtskoordinatentransformation bilden in jedem Rechentakt während des Verlaufs der Simulation für jede Achse einen Achssollwert $\alpha_{1s} \dots \alpha_{4s}$ (Bild 3).

Der rekursiv arbeitende Geradeninterpolator berechnet die Sollposition und -orientierung des Werkzeugvektors nach den Gleichungen:

$$\begin{aligned} x(k) &= x(k-1) + \Delta x \\ y(k) &= y(k-1) + \Delta y \\ z(k) &= z(k-1) + \Delta z \\ U(k) &= U(k-1) + \Delta U \end{aligned} \quad (2)$$

Die Weg- und Orientierungskremente $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ und ΔU berechnen sich entsprechend der Bahngeschwindigkeit v_b .

Mit gleichem Takt werden die entsprechende Achs-Sollwerte über die Rückwärtskoordinatentransformation bestimmt:

$$\begin{aligned} \alpha_{1s}(k) &= f_1(x(k), y(k), z(k), U(k)) \\ \alpha_{2s}(k) &= f_2(x(k), y(k), z(k), U(k)) \\ \alpha_{3s}(k) &= f_3(x(k), y(k), z(k), U(k)) \\ \alpha_{4s}(k) &= f_4(x(k), y(k), z(k), U(k)) \end{aligned} \quad (3)$$

Die Rückwärtskoordinatentransformation ist von der Kinematik des Roboters abhängig und muß entsprechend dem Roboteraufbau speziell abgeleitet werden. Das Modell der dynamischen Simulation zur Berechnung der Bahnverzerrungen unter Berücksichtigung der Lageregel, Antriebe und Massenträgheitsmomente ergibt sich damit gemäß Bild 3.

2.3 Lageregelung und Antriebe

Die Lageregelungskreise und Antriebe des Roboters haben die Aufgabe, die durch Interpolation und Rückwärtskoordinatentransformation ermittelten Führungsgrößen in Bewe-

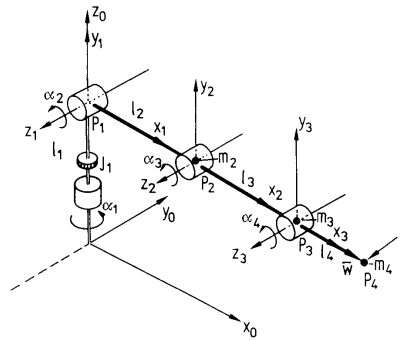


Bild 1. Modell eines Gelenkroboters

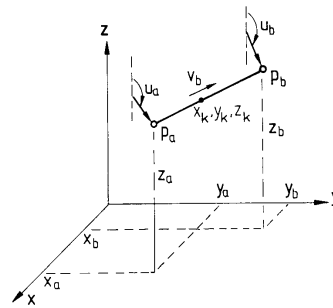


Bild 2. Zur Interpolation

gungen umzusetzen. Die Bewegungsgleichung für die Antriebssysteme läßt sich wie folgt beschreiben:

$$J_a(\alpha) \ddot{\alpha} + M_R(\alpha, \dot{\alpha}) = f(M_m) \quad (4)$$

$J_a(\alpha)$: Massenträgheitsmoment auf der Achse
 $M_R(\alpha, \dot{\alpha})$: Rückkopplungsmoment auf der Achse
 M_m : Antriebsmoment

Das Massenträgheitsmoment $J_a(\alpha)$ ist von der Roboterlage abhängig und ändert sich während der Bewegung. Das Rückkopplungsmoment $M_R(\alpha, \dot{\alpha})$ entsteht durch Rückkopplung der Coriolis-, Zentrifugal- und Gravitationskraft und wirkt als Störgröße für die einzelnen Lageregelkreise. Das verbleibende Antriebsmoment bewirkt über das Getriebe mit Elastizitäts-, Spiel- und Dämpfungseigenschaft die Roboterbewegung.

Zur Lageregelung von Robotern sind verschiedene Regelstrukturen denkbar. In diesem Beitrag wurde beispielsweise die proportionale Lageregelung mit untergelagerter PI-Drehzahlregelung als Lageregelungsmodell gewählt. Die Unter-

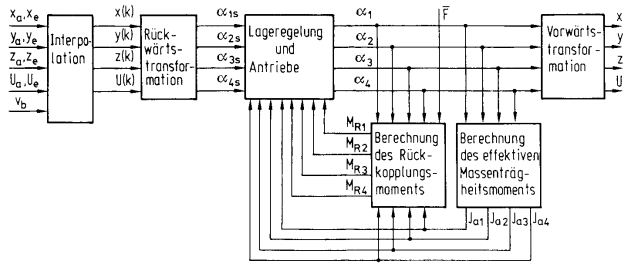


Bild 3. Modell der dynamischen Simulation eines Robotersystems unter Berücksichtigung von Massenträgheitsmomenten und Außenkraft

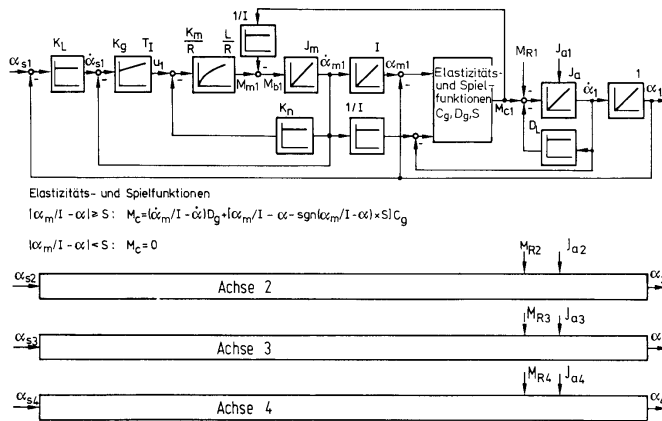


Bild 4. Lagerregelung mit direkter Lagemessung sowie Elastizität und Spielfunktion des Getriebes

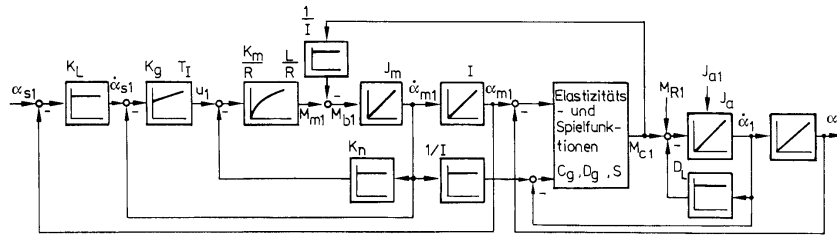


Bild 5. Lagerregelung mit indirekter Lagemessung und nachgiebigem Getriebe

suchungen erstrecken sich auf Lagerregelkreise mit direkter (Bild 4) und indirekter Lagemessung (Bild 5). Dabei bedeuten die Parameter in Bild 4 und Bild 5 folgendes:

- $\alpha_{1s} \dots \alpha_{4s}$: Lage-Sollwert
- K_L : Verstärkung des Lagereglers
- $\dot{\alpha}_{1s} \dots \dot{\alpha}_{4s}$: Geschwindigkeit-Sollwert

- K_g : Verstärkung des Drehzahlreglers
- T_I : Zeitkonstante des Drehzahlreglers
- u : Ankerspannung
- K_m : Momentkonstante
- R : Ankerwiderstand
- L : Ankerinduktivität
- K_n : Drehzahlkonstante

M_m	: Motormoment
M_b	: Motorbeschleunigungsmoment
$\dot{\alpha}_m$: Motorgeschwindigkeit
α_m	: Motorwinkel
J_m	: Motorträgheitsmoment
I	: Getriebeübersetzung
C_g	: Steifigkeit des Getriebes
D_g, D_L	: Dämpfung des Getriebes
S	: Spiel im Getriebe
M_c	: Lastmoment auf dem Getriebe
J_a	: Effektives Massenträgheitsmoment auf der Achse
M_R	: Rückkopplungsmoment von der Achse
$\dot{\alpha}_1 \dots \dot{\alpha}_4$: Achsgeschwindigkeit
$\alpha_1 \dots \alpha_4$: Achswinkel

Zur Untersuchung der Roboterlagerregelung mit Getriebeelastizität wurde bereits ein dynamisches Modell in [1] angegeben. Das hier vorliegende Modell wird um eine Spielfunktion ergänzt, um auch das nicht zu vernachlässigende Getriebespiel nachbilden zu können. Die für NC-Werkzeugmaschinen bekannte Lösung, das Spiel zur dynamischen Modellbildung durch Hysterese nachzubilden, ist für die Darstellung einer Roboterdynamik wegen des Rückkopplungsmoments nicht geeignet. Im folgenden wird daher ein neues dynamisches Modell zur Berücksichtigung des Spiels und der Elastizität unter dem Einfluß des Rückkopplungsmoments abgeleitet (Bild 6). Aus Bild 6 ergeben sich folgende Differenzialgleichungen:

$$J_a \ddot{\alpha} + D_L \dot{\alpha} = M_c - M_R \quad (5)$$

$$M_m - M_c/I = J_m \ddot{\alpha}_m \quad (6)$$

Wegen des Spiels ist das Lastmoment M_c des Getriebes von α_m , α und S abhängig. Es wird durch folgende Elastizitäts- und Spielfunktionen bestimmt:

Ist $|\alpha_m/I - \alpha| \geq S$, sind Roboterachse und Motor über das Getriebe gekoppelt.

$$M_c = (\dot{\alpha}_m/I - \dot{\alpha}) D_g + [\alpha_m/I - \alpha - S \cdot \text{sgn}(\alpha_m/I - \alpha)] C_g \quad (7)$$

Ist $|\alpha_m/I - \alpha| < S$, sind Roboterachse und Motor entkoppelt und

$$M_c = 0. \quad (8)$$

Die Gln. (5)–(8) beschreiben damit das dynamische Modell des Getriebes (Bild 4 und 5) und damit die Elastizitäts- und Spielfunktion. Effektive Massenträgheitsmomente der Achsen J_a und die Rückkopplungsmomente M_R ergeben sich aus den Bewegungsgleichungen des Roboters nach Bild 3 und beeinflussen natürlich das Gesamtverhalten der Lageregelkreise.

2.4 Berechnung des effektiven Massenträgheitsmoments

Die sich ändernden Massenträgheitsmomente $J_{a1} \dots J_{a4}$ werden aus der Roboterkinematik und den Achswinkeln

berechnet. Dabei ergeben sich für das Roboterbeispiel die folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{4j-1} &= A_j \bar{P}_{2j} \quad (j = 4, 3, 2, 1) \\ \bar{P}_{3j-1} &= A_j \bar{P}_{3j} \quad (j = 3, 2, 1) \\ \bar{P}_{2j-1} &= A_j \bar{P}_{2j} \quad (j = 2, 1) \end{aligned} \quad (9)$$

\bar{P}_{j-1} : Koordinate des Massenpunkts i in Koordinatensystem $j-1$

$$\begin{aligned} J_{a1} &= J_1 + |\bar{e}_1 \times \bar{P}_{20}|^2 m_2 + |\bar{e}_1 \times \bar{P}_{30}|^2 m_3 + |\bar{e}_1 \times \bar{P}_{40}|^2 m_4 \\ J_{a2} &= |\bar{e}_2 \times \bar{P}_{21}|^2 m_2 + |\bar{e}_2 \times \bar{P}_{31}|^2 m_3 + |\bar{e}_2 \times \bar{P}_{41}|^2 m_4 \\ J_{a3} &= |\bar{e}_3 \times \bar{P}_{32}|^2 m_3 + |\bar{e}_3 \times \bar{P}_{42}|^2 m_4 \\ J_{a4} &= |\bar{e}_4 \times \bar{P}_{43}|^2 m_4 \end{aligned} \quad (10)$$

$\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ und \bar{e}_4 sind die Einheitsvektoren der Drehachsen. Für die Roboterstruktur in Bild 1 gilt

$$\begin{aligned} \bar{e}_1 &= (0, 0, 1) \\ \bar{e}_2 &= (0, 0, 1) \\ \bar{e}_3 &= (0, 0, 1) \\ \bar{e}_4 &= (0, 0, 1) \end{aligned} \quad (11)$$

2.5 Berechnung des Rückkopplungsmoments

Das Rückkopplungsmoment wird definiert als

$$M_R = M_g - M_{ba} \quad (12)$$

M_g : Gesamtmoment am Roboterarm

M_{ba} : Beschleunigungsmoment für den Arm

Zur Berechnung von M_R werden zunächst die auf alle Massenpunkte im Basiskoordinatensystem wirkenden Beschleunigungen und Kräfte ermittelt. Bei kleinem Rechenakt lassen sich die Beschleunigungen der Massenpunkte aus der Linearisierung der Bewegung ableiten:

$$\bar{B}_i = (\bar{P}_{i0}(k) - 2\bar{P}_{i0}(k-1) + \bar{P}_{i0}(k-2))/\Delta T^2 \quad (i = 2, 3, 4) \quad (13)$$

\bar{B}_i : Beschleunigung des Massenpunktes m_i im Basiskoordinatensystem

ΔT : Rechenakt

Die Kräfte auf den Massenpunkten sind dabei:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{40} &= m_4 \bar{B}_4 - m_4 \bar{g} - \bar{F} \\ \bar{F}_{30} &= m_3 \bar{B}_3 - m_3 \bar{g} \\ \bar{F}_{20} &= m_2 \bar{B}_2 - m_2 \bar{g} \end{aligned} \quad (14)$$

\bar{F}_{i0} : Kraft auf dem Massenpunkt m_i im Basiskoordinatensystem

\bar{g} : Gravitationsbeschleunigung

\bar{F} : Außenkraft

Die Auswirkung einer Kraft auf ein Gelenk läßt sich durch folgende Koordinatentransformation bestimmen:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{4j} &= A_j^{-1} \bar{F}_{4j-1} \quad (j = 1, 2, 3) \\ \bar{F}_{3j} &= A_j^{-1} \bar{F}_{3j-1} \quad (j = 1, 2) \\ \bar{F}_{2j} &= A_j^{-1} \bar{F}_{2j-1} \quad (j = 1) \end{aligned} \quad (15)$$

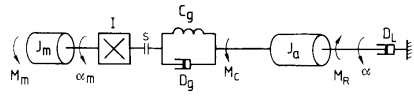


Bild 6. Antrieb mit Elastizität und Spiel

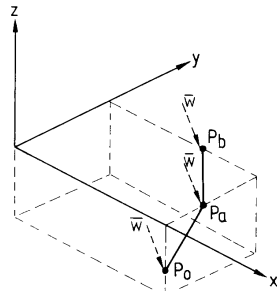


Bild 7. Simulierte Bahn

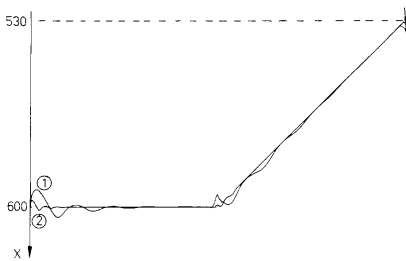
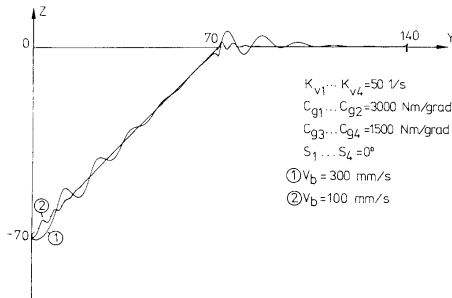


Bild 8. Bahnabweichung bei unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten und direkten Lagemeßsystemen

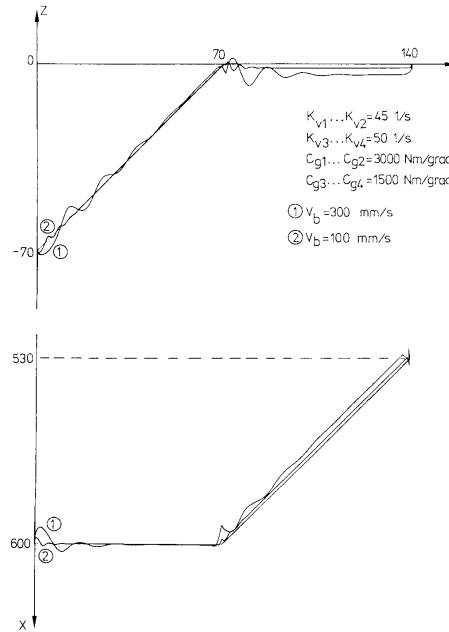


Bild 9. Bahnabweichung verursacht durch ungleiche Geschwindigkeitsverstärkungen der Lageregelkreise bei direkter Lagemessung

\vec{F}_{ij} : Auf das Gelenk j wirkende Kraft, die vom Massenpunkt i erzeugt wird

Das auf ein Gelenk wirkende Moment ergibt sich dabei aus folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} \vec{M}_{4j} &= \vec{F}_{4j-1} \times \vec{r}_{4j-1} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \\ \vec{M}_{3j} &= \vec{F}_{3j-1} \times \vec{r}_{3j-1} \quad (j = 1, 2, 3) \\ \vec{M}_{2j} &= \vec{F}_{2j-1} \times \vec{r}_{2j-1} \quad (j = 1, 2) \end{aligned} \quad (16)$$

\vec{P}_{ij} : Auf ein Gelenk j wirkendes Moment, das vom Massenpunkt i erzeugt wird

Alle Momente werden nun auf die Drehachse projiziert:

$$\begin{aligned} M_{4j} &= (\vec{M}_{4j} \cdot \vec{e}_j) \cdot \vec{e}_j \quad (j = 1, 2, 3, 4) \\ M_{3j} &= (\vec{M}_{3j} \cdot \vec{e}_j) \cdot \vec{e}_j \quad (j = 1, 2, 3) \\ M_{2j} &= (\vec{M}_{2j} \cdot \vec{e}_j) \cdot \vec{e}_j \quad (j = 1, 2) \end{aligned} \quad (17)$$

Damit ergeben sich die auf die Drehachsen wirkenden Gesamtmomente

$$\begin{aligned} M_{\theta 1} &= M_{41} + M_{31} + M_{21} \\ M_{\theta 2} &= M_{42} + M_{32} + M_{22} \\ M_{\theta 3} &= M_{43} + M_{33} \\ M_{\theta 4} &= M_{44} \end{aligned} \quad (18)$$

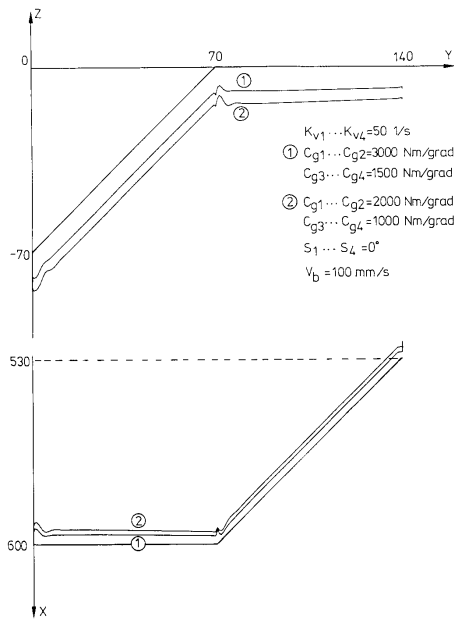


Bild 10. Bahnabweichung aufgrund der Getriebeelastizitäten bei Verwendung von indirekten Lagemeßsystemen

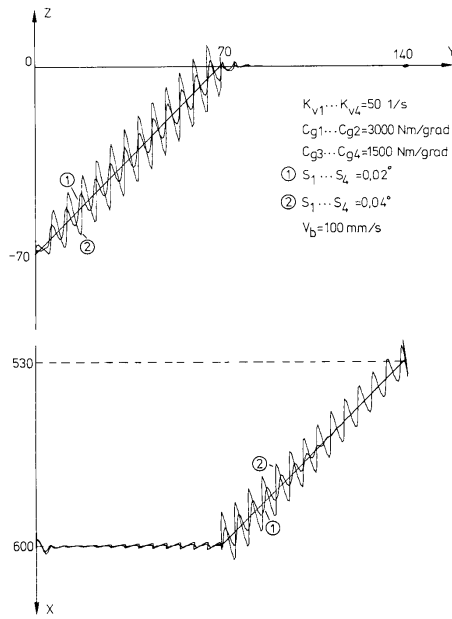


Bild 11. Schwingungen aufgrund des Getriebebeispiels (mit dem direkten Lagemeßsystem)

Das Rückkopplungsmoment wird nach Gl. (12) berechnet

$$M_{Rj} = M_{aj} - J_{aj} \ddot{\alpha}_j \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (19)$$

Über den Gln. (9) und (13) ist $M_R(k)$ aus der Achsbewegung $\alpha(k)$ gegeben. Da jedoch bei der Berechnung von $\alpha(k)$ die Störgröße $M_R(k)$ schon vorher benötigt wird, muß zunächst ein Schätzwert für $M_R(k)$ d. h. $\tilde{M}_R(k)$ aus $M_R(k-1)$ und $M_R(k-2)$ ermittelt und vorgegeben werden. Anschließend kann $\alpha(k)$ durch die Lageregelung und $M_R(k)$ über die Gln. (9) und (13)-(19) berechnet werden.

Für die Schätzung von $M_R(k)$ wurden folgende Verfahren gewählt: der Durchschnittswert von $M_R(k-2)$, $M_R(k-1)$ und $M_R(k)$ innerhalb dreier Rechentakte ist

$$\tilde{M}_R = (M_R(k-2) + M_R(k-1) + M_R(k))/3 \quad (20)$$

wird angenommen, daß

$$\begin{aligned} M_R(k) &\approx \tilde{M}_R(k) \quad \text{aus Gl. (20) und} \\ \tilde{M}_R(k) &\approx (M_R(k-2) + M_R(k-1))/2 \end{aligned} \quad (21)$$

so ergibt sich

$$(M_R(k-2) + M_R(k-1))/2 = (M_R(k-1) + M_R(k-2) + \tilde{M}_R(k))/3 \quad (22)$$

und damit

$$\tilde{M}_R(k) = M_R(k-1) - (M_R(k-1) - M_R(k-2))/2 \quad (23)$$

$\tilde{M}_R(k)$ wirkt als Störgröße auf den Lageregelkreis ein gemäß Bild 4 und 5.

2.6 Berechnung der Werkzeugposition

Die Istposition des Werkzeugvektors in Raumkoordinaten wird nun durch die Vorwärtskoordinatentransformation bestimmt:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 A_3 A_4 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Durch die Bewertung der Abweichung zwischen Istposition und Sollbahn kann damit das dynamische Verhalten eines Roboters beurteilt werden.

3 Simulation der Roboterbewegung

Das vorgestellte Verfahren wurde am Institut für Steuerungstechnik der Universität Stuttgart programmtechnisch

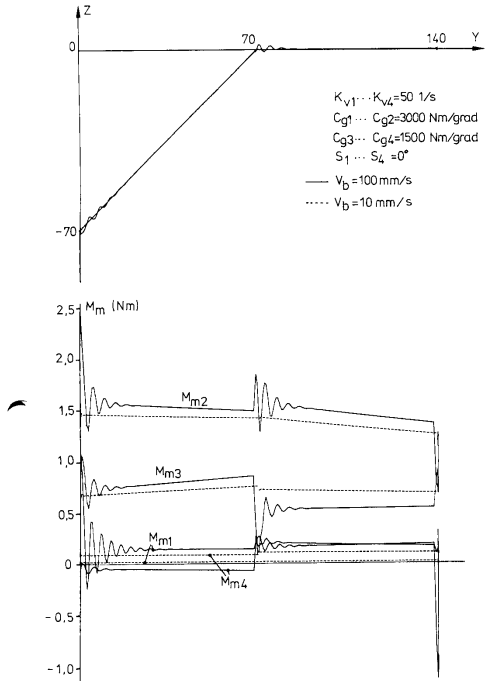


Bild 12. Momentverlauf bei verschiedenen Bahngeschwindigkeiten

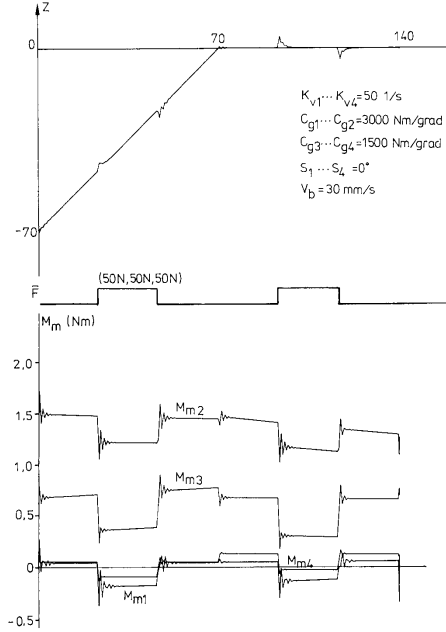


Bild 13. Momentverlauf unter dem Einfluß einer Außenkraft

umgesetzt und getestet. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, daß die Methode für die Auslegung von Robotern ein sehr gutes Hilfsmittel darstellt. Als Eingaben sind nur die Roboterparameter sowie die Verfahrenweisung in Form eines Roboterbewegungsprogramms erforderlich. Als Ergebnis erhält man die Sollbahn und deren dynamische Bahnverzerrungen, sowie die auftretenden Antriebsmomente in den Gelenken.

Im folgenden werden die quantitativen Ergebnisse eines Testlaufes für das zur Darstellung der Methoden verwendete Roboterbeispiel angegeben.

3.1 Roboterparameter

Zur Simulation der Roboterbewegung wurden die Parameter in Tabelle 1 verwendet, die in [1] für einen Gelenkroboter angegeben sind. Die Simulation wurde für verschiedene Werte von K_v , C_g und S durchgeführt.

3.2 Testbahn

Die Testbahn besteht hier aus zwei Geraden, die über drei Punkte vorgegeben sind (Bild 7):

$$\begin{aligned}
 P_0: & x_0 = 600 \text{ mm}, y_0 = 0, z_0 = -70 \text{ mm}, U_0 = 150^\circ \\
 P_a: & x_a = 600 \text{ mm}, y_a = 70 \text{ mm}, z_a = 0, U_a = 150^\circ \\
 P_b: & x_b = 530 \text{ mm}, y_b = 140 \text{ mm}, z_b = 0, U_b = 150^\circ
 \end{aligned}$$

Der Bewegungsvorgang läuft wie folgt ab:

1. Aktivieren in P_0
2. Warten in P_0 : 0.5 Sekunden
3. Fahren von P_0 nach P_a mit der Geschwindigkeit V_b
4. Fahren von P_a nach P_b mit Geschwindigkeit V_b ohne Halt in P_a
5. Warten in P_b : 0.5 Sekunden
6. Stop

Während der Bewegung wirkt eine Außenkraft F auf den Werkzeugvektor. Die Testläufe erfolgen sowohl mit einer Schaltung für ein direktes als auch indirektes Meßsystem.

Tabelle 1. Parametersatz zur Robotersimulation für Lageregelung und Getriebe

	Achse 1	Achse 2	Achse 3	Achse 4
l (mm)	0	400	300	200
m (kg)		20	15	10
J_z (kg m ²)	1			
K_L (1/s)	$K_v I$	$K_v I$	$K_v I$	$K_v I$
K_v (v/grad/s)	0.04	0.04	0.03	0.03
T_I (s)	0.047	0.047	0.076	0.076
K_m (Nm/A)	0.249	0.249	0.098	0.098
R (Ω)	2.5	2.5	2.5	2.5
L (H)	0.00012	0.00012	0.0001	0.0001
K_n (v/grad/s)	0.00435	0.00435	0.00172	0.00172
J_m (kg m ² /grad)	$2.02 \cdot 10^{-5}$	$2.02 \cdot 10^{-5}$	$5.1 \cdot 10^{-6}$	$5.1 \cdot 10^{-6}$
I	128	128	100	100
D_L (Nm/grad/s)	5	5	2	2
D_v (Nm/grad/s)	0.05	0.05	0.02	0.02

3.3 Simulationsergebnisse

Bild 8 zeigt die Bahnverzerrungen beim Fahren entlang der Testbahn mit zwei unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten v_b . Der Start in P_0 und das Einfahren in P_b erfolgen mit asymptotischem Übergang wobei die Bahnverzerrung nach dem Einschwingen durch das direkte Meßsystem gegen Null geht. (Die Bahnabweichung wurde in x- und z-Richtung um den Faktor 10 vergrößert gezeichnet).

Bild 9 zeigt, daß bei ungleichen Geschwindigkeitsverstärkungen K_v in den Lageregelkreisen die Bahnabweichungen bleibende Werte annehmen. Bild 10 zeigt die bleibenden Bahnabweichungen unter dem Einfluß der Getriebeelastizitäten, wenn mit indirekten Lagemeßsystemen gearbeitet wird.

In Bild 11 erkennt man den Einfluß des Getriebeispiels bei der Anwendung direkter Lagemeßsysteme. Die Dauerschwingungen sind unmittelbare Auswirkungen des Spiels.

Die Bilder 12 und 13 zeigen die Motormomentverläufe bei verschiedenen Bahngeschwindigkeiten einmal ohne und einmal mit Außenkraft. Die Außenkraft wirkte während der gesamten Bewegung auf den Werkzeugvektor, man erkennt deutlich ihren Einfluß auf den Bahn- und Motormomentverlauf.

4 Schlußbemerkung

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur Simulation des Roboterbahnverhaltens unter Berücksichtigung der Roboterdynamik, Getriebeelastizität, des Getriebeispiels und der Lageregelung beschrieben. Testergebnisse zum Verfahren wurden auf der Basis eines Modells für einen vierachsigen Gelenkroboter vorgestellt. Die Methode ist auf n Achsen anwendbar. Zur Simulation wird dem System lediglich der Parametersatz des Roboters sowie der gewünschte Bewegungsablauf per Roboterprogrammiersprache vorgegeben. Als Ergebnis erhält man eine graphische Darstellung der dynamischen Bahnverzerrungen als auch der Momentenverläufe der Antriebe.

Das Robotersimulationssystem kann sowohl die Parameter- und Strukturoptimierung beim Roboterentwurf als auch die Bahngenerierung bei der off-line Programmierung unterstützen. Da auch eine Außenkraft als Störgröße in das Modell gebracht werden kann, ist zudem eine Simulation von Bearbeitungsvorgängen mit und ohne Regelung technologischer Größen möglich. Damit steht am Institut für Steuerungstechnik der Universität Stuttgart ein wirkungsvolles Instrument für den Robotersystementwurf zur Verfügung.

Literatur

1. Paul, R. P.: Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control. Cambridge: MIT Press 1981
2. Kuptz, M.: Simulation der Dynamik bei Bewegungsverläufen vom Industrieroboter. Studienarbeit am ISW 1986
3. Autorenkollektiv: Lageregelung an Werkzeugmaschinen. ISW 1975
4. Vukobratovic, M.; Pothonjak, V.: Dynamics of Manipulation Robots. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo: 1985
5. Schwarz, W.; Zecha, M.; Meyer, G.: Industrierobotersteuerung. Heidelberg: Hüthig Verlag 1986

Prof. Dr.-Ing. G. Pritschow
Dipl.-Ing. J. Huan
ISW-Stuttgart
Seidenstraße 36
7000 Stuttgart 1

Eingegangen am 22. Dezember 1988