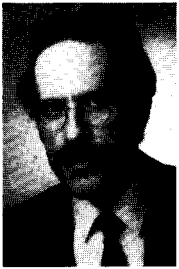


Aktive Dämpfung der Gier- und Nickschwingung an einem Roboterarm mit Dehnungs- und Beschleunigungssensoren

Active damping of yaw and pitch vibrations in a robot arm with strain gage and acceleration sensors

Gernot Hoffmann, Emden



Prof. Dr. Gernot Hoffmann ist Inhaber eines Ingenieurbüros und an der Fachhochschule Ostfriesland Dozent für die Lehrgebiete Mathematik, Regelungstechnik, Elektrische Antriebe und Fertigungsmesstechnik. Hauptarbeitsfeld: Seilroboter, Rechnergesteuerte Marionetten.

Adresse: siehe Internet Seiten

Ein Experimentalroboter mit elastischem Arm, der sich kinematisch um die Gier- und die Nickachse bewegen kann, wird beschrieben. Es folgt die Erläuterung der physikalischen Prinzipien für die aktive Schwingungsdämpfung an jeder entkoppelten Achse. Der Stellmotor für den Achsantrieb bewirkt die Dämpfung durch überlagerte kleine Bewegungen. Besonderes Gewicht hat die Frage, wie aus Dehnungsmeßwerten ohne Differentiation die Handgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Verschiedene Konzepte werden diskutiert. Als Ergebnis liegt ein sehr einfaches Reglerfilter vor, das im Digitalrechner mit ziemlich kleiner Abtastrate auskommt. Weiterhin wird gezeigt, daß mit derselben Reglerstruktur anstelle des Dehnungsmeßwerts ein Beschleunigungsmeßwert verwendet werden kann. Experimente bestätigen die Theorie.

An experimental robot with elastic arm is considered. The arm moves kinematically about the yaw- and the pitch-axis. Physical principles of the active vibration damping for one decoupled degree of freedom are discussed. The hinge drive servo actuator performs the damping by additional small motions. Special emphasis is given to the estimation of the hand velocity, avoiding any differentiation of strain gage sensor signals. Several principles are explained and the result is a very simple controller filter, that needs a rather low sampling rate in the digital computer. Furthermore it turns out, that accelerometers are suitable instead of strain gages, using the same controller structure. The theory is proved by experiments.

1. Einführende Übersicht

Der Verfasser ist kein Fachmann für elastische Industrieroboter, er hat aber Anfang der siebziger Jahre einen gewissen Beitrag zur damals aufblühenden Forschung an

Regelungssystemen für elastische Flugzeuge in böiger Luft geleistet. Es ist bemerkenswert, daß alle diese Arbeiten nicht den geringsten Widerhall in der erst zehn Jahre später begonnenen Entwicklung von Reglern für elastische Roboter gefunden haben.

Im ausgezeichneten Sammelband [1] finden sich keine sachdienlichen Aufsätze. Auch ergaben Umfragen des Verfassers auf der Hannover-Messe, daß in der industriellen Praxis die Elastizität der Roboter kein Thema von großer Bedeutung ist. Dies wird sich erst bei Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt ändern. Eine Recherche in der Zeitschrift „Robotersysteme“ blieb ergebnislos, denn die Aufsätze [2] und [3] betreffen nur die Elastizität der Getriebe. In der „Regelungstechnik/Automatisierungstechnik“ findet man mit [4] einen Aufsatz von fundamentaler Bedeutung, der es verdient hätte, in späteren Arbeiten zitiert zu werden. Als Hinweise für den beachtlichen Stand der Forschung an elastischen Robotern an zwei Instituten in der Bundesrepublik werden die repräsentativen Quellen [5], [6] und [12] angegeben, dort findet man weitere Literatur.

Allen Arbeiten ist gemeinsam, daß die Aufgabe a priori als Problem der Reglersynthese im Zustandsraum angegangen wird, mit der Folge, daß die Erklärung der physikalischen Ursachen der Reglerfunktion zu kurz kommt. Für die Entwurfsverfahren ist eine äußerst präzise Systemidentifizierung nötig. Die Regler sind im Ergebnis – meistens wegen der Verwendung von Beobachtern – recht kompliziert und erfordern einen hohen meß- und rechentechnischen Aufwand, der dem Einsatz im fertigen Industrieprodukt entgegensteht.

Die vorliegende Arbeit betrifft die Entwicklung eines digitalen Reglers zur Dämpfung von Gier- und Nickschwingungen an einem Experimentalroboter mit elastischem Arm und zwei entkoppelten Achsen, dem „Flex-Roboter“. Sie behandelt, zum Teil mit Bezug auf die oben genannten Kritikpunkte, folgende Aspekte:

- Darlegung der physikalischen Prinzipien,
- Konzept für den alternativen Einsatz von Beschleunigungssensoren und Dehnungssensoren mit Signalrauschen,
- Entwurf besonders robuster und einfacher Regelalgorithmen mit angemessen niedriger Abtastrate,
- Berücksichtigung der Stellmotordynamik und des Getriebebaus,
- Experimentelle Erprobung mit Einsatz von Prozeßrechnern.

Gelingt es, einen relativ langsamen Roboter mit Hilfe der Modaltransformation in (stellungsabhängige) einzelne Schwinger aufzulösen, so werden sich die hier präsentierten Regelungsmethoden auch verallgemeinern lassen, obschon sie nur für sehr einfache Modelle hergeleitet wurden. Für Roboter mit schnell veränderlichen Eigenvektoren im elastischen Bereich gilt dies sicher nicht.

2. Elektromechanischer Aufbau des Flex-Roboters

Der Flex-Roboter nach Bild 1 und Bild 2 hat zwei kinematische Freiheitsgrade, den Gierwinkel um die Hochachse mit $\pm 100^\circ$ und den Nickwinkel θ um die Querachse mit $\pm 15^\circ$ Arbeitsweg. Im Gierantrieb wird ein Scheibenläufermotor (600 W) mittels Tachogenerator und Inkremental-Encoder letztlich analog drehzahl- und positionsgeregelt. Der Motor treibt den Drehteller über ein Zykloidengetriebe (1 : 17) in der offenen Steuerkette, so daß das beträchtliche Getriebespiel $\pm 0,4^\circ$ zwar zu Ungenauigkeiten führt, die Dynamik der Starrkörperregelung aber nicht beeinflusst.

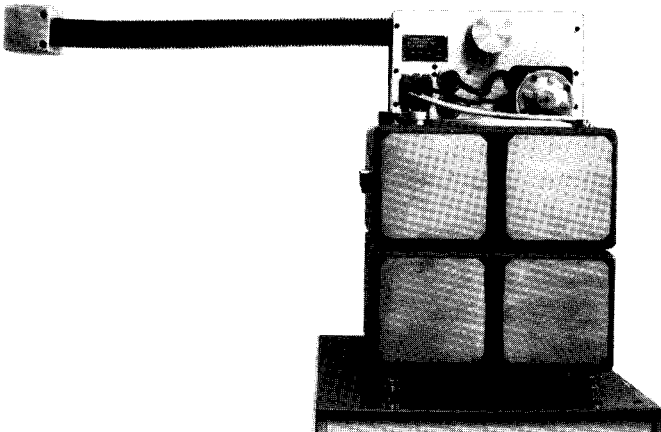


Bild 1. Gesamtansicht des Flex-Roboters.

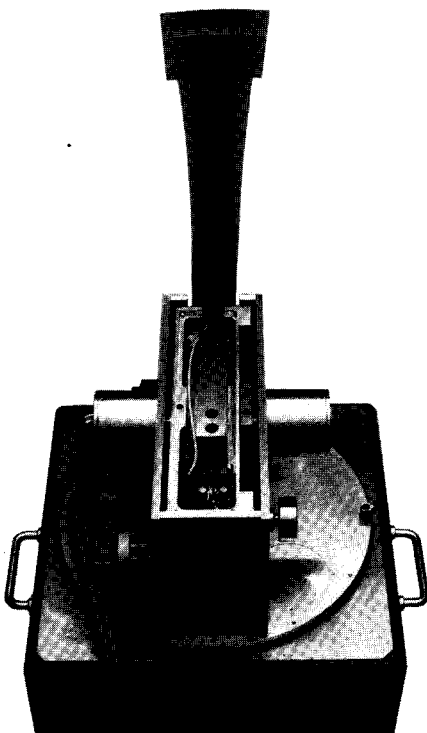


Bild 2. Nickantrieb und schwingender Arm des Flex-Roboters.

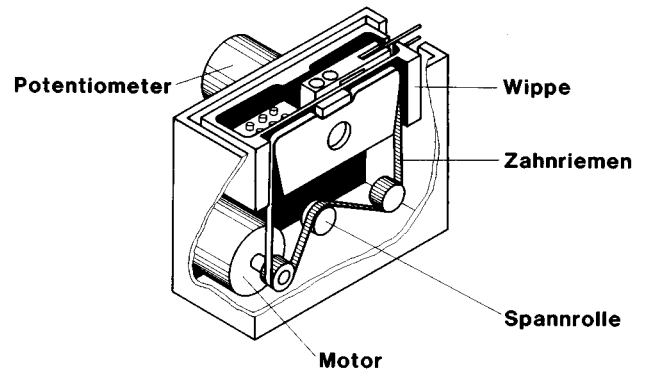


Bild 3. Wippenantrieb für den Nickfreiheitsgrad.

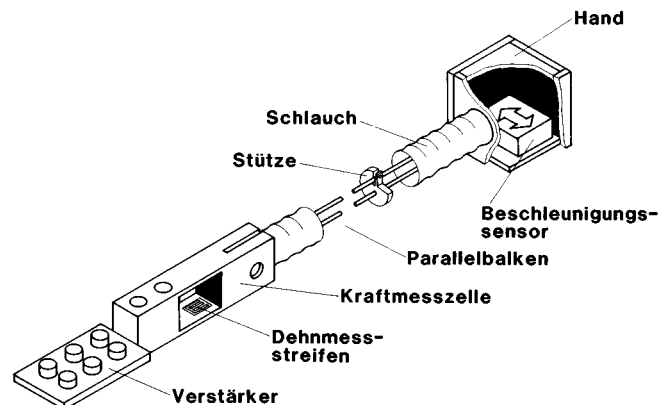


Bild 4. Elastischer Arm mit Dehnungs- und Beschleunigungsmessung.

Im Nickantrieb wird die Wippe nach Bild 3 mittels Scheibenläufermotor (150 W), Tachogenerator, Zahnriemen und Potentiometer am Abtrieb analog drehzahl- und lagegeregelt. Der Riemen übersetzt 1 : 10. In beiden Achsen kann der Abtrieb relativ schnell positioniert werden (Kennfrequenzen für Winkel bis ± 10 Grad: 6 Hz für den Gierantrieb, 12 bis 18 Hz für die Wippe), wenn kein Arm angebracht ist (Starrkörper-Regler).

Der Arm besteht nach Bild 4 aus einem Parallelbalken, nämlich aus zwei Stahldrähten mit 4 mm Durchmesser und 700 mm Länge, die an beiden Enden eingespannt sind. Dadurch kann die Hand (Masse 600 g) für $\psi = 0$ und $\theta = 0$, also bei festgehaltener Wippe, Biegeschwingungen mit 1,5 Hz in Gierrichtung und Parallelschwingungen mit 3 Hz in Nickrichtung ausführen. Der Schlauch dient nur zur Verkleidung und erzeugt keine nennenswerte Dämpfung. Die beiden Schwingungen sind offensichtlich sehr gut über den Gierantrieb und den Nickantrieb zu beeinflussen.

Die nächste Eigenschwingung ist die Torsion der Hand bei 18 Hz; angeregt wird sie infolge der exzentrischen Schwerpunkttiefe der Hand durch Gierbewegungen. Diese Schwingung ist zwar theoretisch steuerbar, praktisch aber nicht, weil dies den Gierantrieb dynamisch überfordern würde.

Zur Dämpfung der elastischen Schwingungen soll die „Flex-Regelung“ einer üblicherweise schon vorhandenen Starrkörper-Regelung überlagert werden, und zwar durch passende Ausgleichsbewegungen des Drehtellers oder der Wippe.

Folgende Größen werden gemessen: Die Beschleunigung in Umfangsrichtung mittels Beschleunigungssensor (Servoprinzip) für die Gierbewegung, sowie die Dehnung an der Armwurzel (Dehnungsmeßstreifen) für die Nickbewegung.

Bild 4 zeigt auch die Kraftmeßzelle für die elastische Nickbewegung. Je ein Dehnungsmeßstreifen ist oben und unten auf der Innenseite angebracht. Dadurch heben sich Temperaturdriften bei gleichmäßiger Erwärmung auf. Die Kraftmeßzelle ist überdimensioniert, um Schäden durch zu große Beanspruchung zu vermeiden. Daher müssen die Signale der Dehnungsmeßstreifen um den Faktor 4000 verstärkt werden. Die statische Belastung durch das Gewicht der Hand wird grob kompensiert. Das Signal wird außerdem zweipolig mit der Eckfrequenz 100 Hz gefiltert.

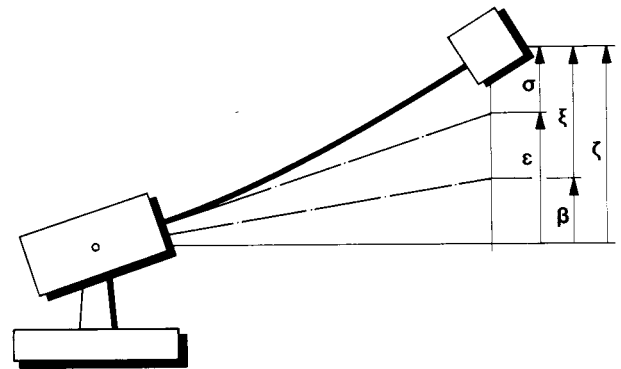


Bild 5. Koordinaten für einen Freiheitsgrad des Flex-Roboters.

3. Bewegungsgleichungen und Regelungsprinzipien

a) Grundkonzept

Der Gier- und der Nickfreiheitsgrad werden getrennt behandelt. Die folgenden Darlegungen gelten für den Nickfreiheitsgrad mit Dehnungsaufschaltung, sie sind aber in einfacher Weise auf den Gierfreiheitsgrad mit Beschleunigungsaufschaltung übertragbar. Feinheiten, wie das Getriebeispiel oder die Servodynamik, werden später erörtert.

Obwohl sich die Hand auf einer Kugel bewegt, können die Bewegungen entkoppelt betrachtet und durch den folgenden Satz von gleichwertigen Signalen, Weg- oder Winkelkoordinaten bzw. elektrischen Signalen beschrieben werden (die Nomenklatur der Regelungstechnik reicht für eine konsistente Beschreibung nicht aus). In Bild 5 werden die wichtigsten geometrischen Zusammenhänge dargestellt.

- α Sollweg, ungefiltert,
- β Sollweg, hinter Führungsfilter mit vorgegebener Dynamik,
- γ Reglerausgang,
- δ Servomotorausgang hinter idealem Getriebe mit Übersetzung,
- ϵ Stellsystemausgang hinter realem Getriebe mit Übersetzung 1 : 1, mit Spiel und Elastizität,
- ζ Weg der Hand im Inertialsystem,
- ξ Regelabweichung der Hand, bezogen auf gefilterten Sollwert,
- σ Elastische Dehnung der Armwurzel beim Nicken (Meßwert),
- μ Beschleunigung der Hand beim Gieren (Meßwert),
- q Gefilterter Meßwert, hinter Meßfilter,
- κ Störmoment, ausgedrückt als äquivalente Durchbiegung der Hand.

Bild 6 zeigt die prinzipielle Struktur des Gesamtsystems (wobei für die präzisere Modellierung des Getriebeispiels auf Bild 13 verwiesen wird). Der Regler erhält vom Führungsfilter gegebenenfalls nicht nur den Weg β , sondern auch dessen beide Ableitungen. Er verwendet weiterhin die meßbaren Größen ϵ und σ , nicht aber ζ .

Folgende Indizes werden nach Bedarf verwendet:

- 1 = F Führungsfilter,
- 3 = R Regler, Bandpaß-Integrierer,
- 3 = D Regler, Differenzierer,
- 3 = B Regler, Beobachter,
- 5 = I Regler, Integrierer,
- 7 = S Servomotor mit idealem Getriebe,
- 9 = G Getriebe mit Spiel und Elastizität,
- 11 = A Arm mit Hand,
- 13 = M Meßfilter.

Die Bewegungsgleichung des Arms in Inertialkoordinaten lautet:

$$\ddot{\zeta} + \omega_A^2 \zeta = \omega_A^2 \epsilon + \omega_A^2 \kappa. \tag{1}$$

Der Arm folgt einer sprungförmigen Wegvorgabe ϵ des Getriebes mit ungedämpften Schwingungen um die neue statische Ruhelage. Das Störmoment κ interessiert zunächst nicht.

Die der Starrkörper-Regelung überlagerte Flex-Regelung hat zum Ziel: Die Schwingung soll gedämpft werden, indem eine viskose Dämpfung nachgebildet wird. Dies bedeutet: Bewegt sich die Hand mit der Geschwindigkeit $\dot{\zeta}$ elastisch nach unten, so muß die Wippe schnellstmöglich nach oben ausgelenkt werden und zwar um einen Winkel proportional zur Geschwindigkeit. Daraus folgt

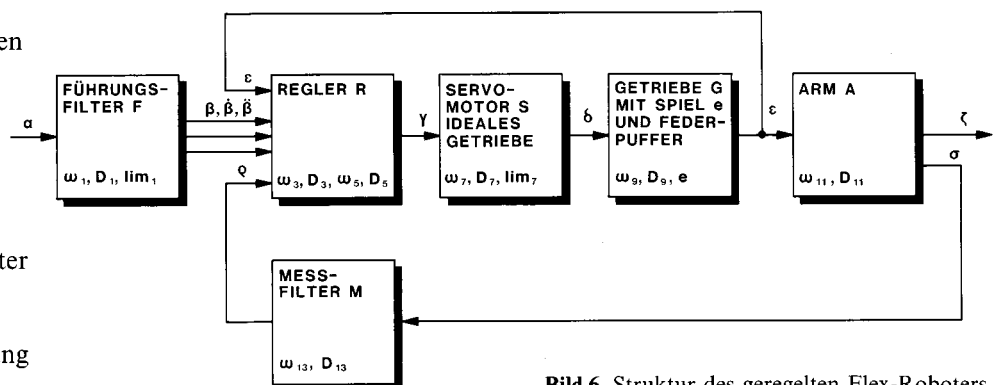


Bild 6. Struktur des geregelten Flex-Roboters.

das Regelgesetz, und zwar zunächst für einen idealen Stellantrieb mit $\varepsilon = \gamma$:

$$\varepsilon = \beta - K_D \dot{\xi} / \omega_A, \quad (2)$$

$$\xi = \zeta - \beta, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \beta + K_D \dot{\beta} / \omega_A - K_D \dot{\zeta} / \omega_A. \quad (4)$$

In dieser Formulierung ist der simulierte Dämpfer an der Hand und nach Bild 5 am Sollweg β angebracht, d. h. die Hand läuft gewissermaßen in einer von β mitgeschleppten Ölwanne. Regelungstechnisch hat dies zur Folge, daß das Führungssignal β nicht nur proportional sondern auch differenziert auf die Strecke wirkt, was im allgemeinen zu starken Überschwingern in der Sprungantwort führt (PD-Regler im Vorwärtszweig).

Für ein ideales und beliebig schnelles Stellsystem wird sich PT2-Verhalten mit dem Dämpfungsgrad D_A ergeben und es gilt $K_D = 2D_A$. Gemessen wird die elastische Deformation σ mittels Dehnungsmeßstreifen. Nach Bild 5 gilt:

$$\zeta = \sigma + \varepsilon. \quad (5)$$

Damit lautet das Regelgesetz:

$$\varepsilon = \beta + K_D \dot{\beta} / \omega_A - K_D (\dot{\sigma} + \dot{\varepsilon}) / \omega_A. \quad (6)$$

Das Signal $\dot{\beta}$ würde vom Führungsfilter bereitgestellt, also keineswegs durch Differentiation erzeugt. Läßt man in Gl. (6) die β -Aufschaltung weg, so entspricht dies der Anbringung des Dämpfers an der Hand und am Inertialsystem, die „Ölwanne“ ist nun raumfest. Als Analogie kann man sich ein Servosystem mit Tachorückführung der Geschwindigkeit und P-Regelung im Vorwärtszweig vorstellen. Die Sprungantwort schwingt weniger über, das dynamische Verhalten, insbesondere bei Berücksichtigung der Begrenzungen im Leistungsverstärker, ist besser als bei der PD-Regelung. Aufgrund der Erfahrungen in Simulationen und am Flex-Roboter wird die β -Aufschaltung weggelassen.

ε ist der Winkel der Wippe, die Ableitung $\dot{\varepsilon}$ ist (im wesentlichen) durch das Tachosignal $\dot{\delta}$ gegeben. Jedoch

scheitert dessen Verwertung daran, daß die Tachosignale für die Starrkörperregelung nicht skaliert benötigt wurden und daher nicht mit bekanntem Skalenfaktor verfügbar sind. Generell soll die Zahl der verwendeten Meßgrößen möglichst klein gehalten werden. Daher muß außer σ auch ε differenziert werden, was nach der Summenbildung gemeinsam geschehen kann.

(wird fortgesetzt)

Literatur

- [1] Tagung „Steuerung und Regelung von Robotern“, Langen 1986. VDI-Bericht 5981, VDI-Verlag, Düsseldorf 1986.
- [2] Kuntze, H.-B., und Jacobasch, A.: Algorithmen zur versteifenden Regelung von elastischen Industrierobotern. Robotersysteme 1 (1985), S. 99–109.
- [3] Pritschow, G., und Huan, J.: Methode zur Robotersimulation unter Berücksichtigung der schwingungsfähigen Mechanik und lagegeregelten Antriebe. Robotersysteme 5 (1989), S. 69–76.
- [4] Truckenbrodt, A.: Regelung elastischer mechanischer Systeme. Regelungstechnik 30 (1982), S. 277–285.
- [5] Pfeiffer, F., und Gebler, B.: A multistage-approach to the dynamics and control of elastic robots. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotic and Automation, Philadelphia 1988.
- [6] Henrichfreise, H., und Moritz, W.: Regelung eines elastischen Knickarmroboters. VDI-Bericht 598, VDI-Verlag, Düsseldorf 1986.
- [7] Föllinger, O.: Regelungstechnik, Elitera-Verlag, Berlin 1978.
- [8] Bülthuis, J.: Konstruktion des Antriebs für einen elastischen Roboterarm. Diplomarbeit, Fachhochschule Ostfriesland 1989.
- [9] Hoffmann, G.: Stabilisierung, Böenkompensation und Schwingungsdämpfung am elastischen beweglichen Flugzeugmodell im Windkanal. Dissertation, TU Braunschweig 1976 (DLR-FB 76-44).
- [10] Hoffmann, G.: Digitale Approximation kontinuierlicher Übertragungssysteme (QTA-Verfahren). Automatisierungstechnik 35 (1987), S. 148–155.
- [11] Hoffmann, G., und Linhardt, M.: MIMOS-System. Braunschweig 1985. (ca. 250 Seiten, erhältlich beim Verfasser.)
- [12] Kleemann, U.: Regelung elastischer Roboter. Fortschrittberichte VDI, Reihe 8, Nr. 191, VDI-Verlag, Düsseldorf 1989.

Manuskripteingang: 6. Juni 1989.

Fortsetzung folgt

Aktive Dämpfung der Gier- und Nickschwingung an einem Roboterarm mit Dehnungs- und Beschleunigungssensoren

Active damping of yaw and pitch vibrations in a robot arm with strain gage and acceleration sensors

Gernot Hoffmann, Emden

Teil 2, Fortsetzung von Heft 3/1991.
Der Autor wurde am Anfang des Teiles 1 vorgestellt.

Ein Experimentalroboter mit elastischem Arm, der sich kinematisch um die Gier- und die Nickachse bewegen kann, wird beschrieben. Es folgt die Erläuterung der physikalischen Prinzipien für die aktive Schwingungsdämpfung an jeder entkoppelten Achse. Der Stellmotor für den Achsantrieb bewirkt die Dämpfung durch überlagerte kleine Bewegungen. Besonderes Gewicht hat die Frage, wie aus Dehnungsmeßwerten ohne Differentiation die Handgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Verschiedene Konzepte werden diskutiert. Als Ergebnis liegt ein sehr einfaches Reglerfilter vor, das im Digitalrechner mit ziemlich kleiner Abtastrate auskommt. Weiterhin wird gezeigt, daß mit derselben Reglerstruktur anstelle des Dehnungsmeßwerts ein Beschleunigungsmeßwert verwendet werden kann. Experimente bestätigen die Theorie.

An experimental robot with elastic arm is considered. The arm moves kinematically about the yaw- and the pitch-axis. Physical principles of the active vibration damping for one decoupled degree of freedom are discussed. The hinge drive servo actuator performs the damping by additional small motions. Special emphasis is given to the estimation of the

hand velocity, avoiding any differentiation of strain gage sensor signals. Several principles are explained and the result is a very simple controller filter, that needs a rather low sampling rate in the digital computer. Furthermore it turns out, that accelerometers are suitable instead of strain gages, using the same controller structure. The theory is proved by experiments.

b) Regelung mittels Differentiation

Für die Differentiation gibt es mehrere Möglichkeiten (wobei ab jetzt die Notation im Bildraum der Laplace-Transformation mit dem Operator s ohne Änderung der Bezeichnung der Variablen gilt). Bei der Realisierung muß zur idealen Differentiation (D-Glied) $F(s) = s$ ein Tiefpaß mit der Eckfrequenz ω_D in Reihe geschaltet werden (DPT1-Glied):

$$F_D = s \frac{1}{s/\omega_D + 1} \quad (7)$$

Der Differenzierer soll bei der Armfrequenz ω_A mit möglichst guter Näherung den Phasenwinkel $+90^\circ$ erzeugen. Hierzu ist normalerweise $\omega_D > 5\omega_A$ erforderlich, das Filter wird also wesentlich breitbandiger als eigentlich nötig, und es tritt trotzdem ein Phasenfehler auf.

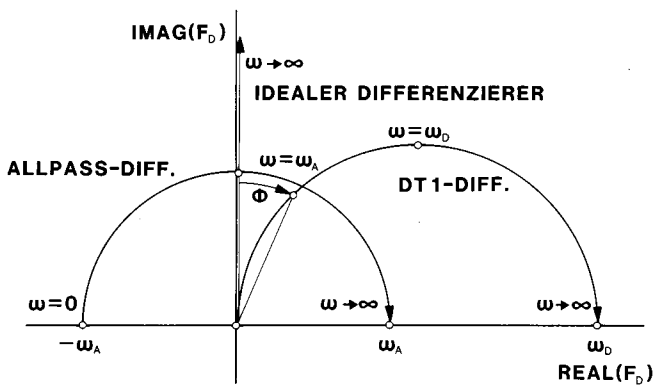


Bild 7. Frequenzgang-Ortskurven für Differenzierer.

Rauschsignale hoher Frequenz werden mit ω_D verstärkt, was insbesondere für die Dehnungsmessung problematisch ist.

Allpaß-Differenzierer (APT1-Glied) mit $\omega_D = \omega_A$:

$$F_D = \omega_A \frac{s - \omega_D}{s + \omega_D} \tag{8}$$

Nach Meinung des Verfassers wurde dieser Differenzierer, siehe Bild 7, bisher nicht zur Diskussion gestellt. Er erzeugt allerdings eine statisch destabilisierende Mitkopplung, die von der Eigenstabilität der Strecke aufgefangen werden muß. Genau das kann der elastische Arm aufgrund seiner natürlichen Federsteifigkeit. Der Nutzeffekt besteht darin, daß der Allpaß nicht nur exakt 90° Phasenvorhalt ohne unnötig große Bandbreite erzeugt, sondern daß sogar eine zusätzliche positive Phasenreserve generiert werden kann, indem man entweder $\omega_D > \omega_A$ wählt oder die gesamte Kennlinie nach links verschiebt. Auf diese Weise kann man mit einer einzigen Filterstruktur beliebige allpaßhaltige Differenzierer konstruieren, wobei das DPT1-Glied als Grenzfall enthalten ist. Weiterhin enthalten sind halbkreisförmige nach rechts verschobene Kennlinien (D-Anteil in einem begrenzten Frequenzbereich, sonst P-Verhalten).

Die Regelung mittels Allpaß ist nur schwer vorstellbar und soll daher an einem Beispiel demonstriert werden. Im Vorwärtszweig liegt der ungedämpfte Oszillator nebst

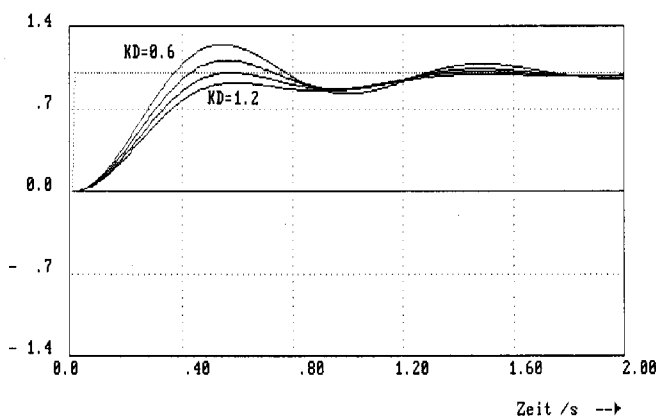


Bild 8. Sprungantwort eines allpaßgeregelten Schwingers.

Verstärkungsfaktor $V\omega_A^2/(s^2 + \omega_A^2)$ und in der Rückführung der Allpaß nebst Verstärkung $K_D\omega_A(s - \omega_A)/(s + \omega_A)$.

Aufgrund der statischen Mitkopplung muß $V = 1/(1 + K_D)$ gelten, wenn der statische Übertragungsfaktor Eins bleiben soll. Wegen $K_D = 2D_A$ sieht man in der Simulation nach Bild 8 Sprungantworten für $K_D = 0,6, 0,8, 1,0$ und $1,2$. Es ist $f_A = 1$ Hz. Alle Sprungantworten sind brauchbar gedämpft., auffällig ist immer die Nachschwingung. Jedenfalls ist der Allpaß-Differenzierer geeignet, Dämpfung zu erzeugen.

Am Flex-Roboter wurden der DPT1- und der APT1-Differenzierer experimentell erprobt.

Mit dem DPT1-Differenzierer ließ sich das System dämpfen, jedoch war dazu eine außerordentlich feine Abstimmung des Aufschaltfaktors K_D , der Frequenz ω_D , und der Frequenz ω_M des Meßfilters, das die Signale vor der AD-Umsetzung filtert, erforderlich. Die Tendenz zu instabilen hochfrequenten Schwingungen war sehr stark, so genügten kleinste Veränderungen der Spannung des Zahnriemens zu deren Auslösung. Ähnlich sensibel reagierte das System auf Änderungen der Einstellung des PD-Starrkörper-Reglers. Es soll nochmals daran erinnert werden, daß nach einem robusten Regler gesucht wird, der keinesfalls von nebensächliche Streckenparametern abhängen darf. Dieses Prinzip ist also praktisch unbrauchbar und digital auch deswegen schlecht anwendbar, weil die unnötig große Bandbreite ω_D verarbeitet werden muß.

Mit dem Allpaß-Differenzierer konnten gute Ergebnisse erzielt werden, insbesondere nach Verschiebung der Kennlinie in Bild 7 nach links, wodurch die Phasenverzögerung des Stellantriebs und des Meßfilters aufgefangen wird. Aufgrund der statischen Destabilisierung wird das System allerdings sehr weich, so daß die Hand keine nennenswerte Nutzlast transportieren kann. Diesem Übel könnte man durch eine überlagerte Sensorführung leicht abhelfen, das äußerst gutmütige Verhalten bietet dafür eine gute Grundlage. Ganz allgemein ist klar, daß der Flex-Roboter mit Nutzlast nicht präzise positionieren kann, weil die Position der Hand nicht gemessen wird. Das Allpaß-Prinzip hat weiterhin den Nachteil, daß die Nullpunktdrift des Dehnungs-Verstärkers nicht beseitigt wird.

Über eine Systematik digitaler Differenzierer hat der Verfasser schon früher berichtet [10]. Die Beschaffung der Ableitung mittels Beobachter wird am Ende des folgenden Abschnitts erläutert.

Quintessenz aller bisherigen Untersuchungen an Regelungen elastischer Systeme ist die folgende Erkenntnis: Der Regler muß Signale jenseits des Nutzspektrums ω_A stark abschwächen, sonst gibt es aufgrund der vielfältigen Phasendrehungen der Strecke inklusive der versteckten höheren Eigenformen beliebig viele Möglichkeiten zur Instabilität, was nach dem Nyquist-Kriterium sofort einleuchtet.

Wie man sehen wird, läßt sich das Problem der Differentiation elegant vermeiden.

c) Regelung mittels Integration

Bild 9 zeigt oben das Signalflußbild für den elastischen Arm (und unten einen Beobachter). Läßt man die Störung κ weg, so findet man folgenden Zusammenhang:

$$\dot{\zeta} = -\omega_A^2 \int \sigma dt. \tag{9}$$

Somit läßt sich $\dot{\zeta}$ statt durch Differentiation von $(\sigma + \varepsilon)$ auch durch Integration von $(-\sigma)$ berechnen.

In Bild 10 sieht man die Signalflußbilder für beide Konzepte wobei das Stellsystem und das Meßfilter als ideal und beliebig schnell angenommen wird. Man kann leicht zeigen, daß beide Systeme mit $K_D = 2D_A$ die folgende PT2-Übertragungsfunktion haben:

$$\frac{\zeta}{\beta} = \frac{\omega_A^2}{s^2 + 2D_A \omega_A s + \omega_A^2}. \tag{10}$$

Nun muß anstelle der Differentiation die Integration realisiert werden.

Nullpunktfehler des Meßverstärkers dürfen auf keinen Fall integriert werden, daher soll das Meßsignal zunächst einen Hochpaß oder Bandpaß durchlaufen. Der Bandpaß wird als System 2. Ordnung mit $\omega_R = \omega_A$ folgendermaßen realisiert:

$$F_R = \frac{2D_R \omega_R s}{s^2 + 2D_R \omega_R s + \omega_R^2}. \tag{11}$$

Nach Bild 11 (links) überträgt er bei $\omega = \omega_A$ mit dem Faktor Eins. Dann muß das Signal driftfrei integriert werden. Aus regelungstechnischer Sicht genügt schon die Phasendrehung um -90° . Diese Phasendrehung kann man zum Beispiel mit einem Allpaß-Phasenschieber oder mit einem Tiefpaß erzeugen. Die beste Lösung besteht darin, den Bandpaß direkt als Näherungsintegrierer zu verwenden. Hierzu wird nach Bild 11 (rechts) der Bandpaß mit $\omega_R \ll \omega_A$ wesentlich tiefer als die Armfrequenz abgestimmt. Die Übertragungsfunktion lautet:

$$F_R = \frac{\omega_A s}{s^2 + 2D_R \omega_R s + \omega_R^2}. \tag{12}$$

Für $s \rightarrow \infty$ ist $F_R(s) = \omega_A/s$, wie für die Integration gewünscht.

Die Regelungsausschaltung mittels Dehnungsmeißwert σ lautet nach Ersatz von $\dot{\zeta}/\omega_A$ in Gl. (4) durch Gl. (9) und Verwendung von Gl. (12) anstelle der exakten Integration:

$$\varepsilon = \beta + K_D \frac{\omega_A s}{s^2 + 2D_R \omega_R s + \omega_R^2} \sigma. \tag{13}$$

Brauchbare Ergebnisse erhält man für $\omega_R = (0,1 \text{ bis } 0,3) \omega_A$. Eine zu niedrige Abstimmung erzeugt schleichende Teilbewegungen. Die Integration muß keineswegs exakt mit der Phase -90° ausgeführt werden, vielmehr ist der kleine Phasenfehler nach Bild 11 (rechts) sehr gut geeignet, um die Phasendrehungen des Meßfilters und des Stellsystems auszugleichen. Der Regler muß natürlich das Nutzspektrum ω_A abdecken, enthält darüber hinaus aber keine höhere Bandbreite. Er ist daher hervorragend für

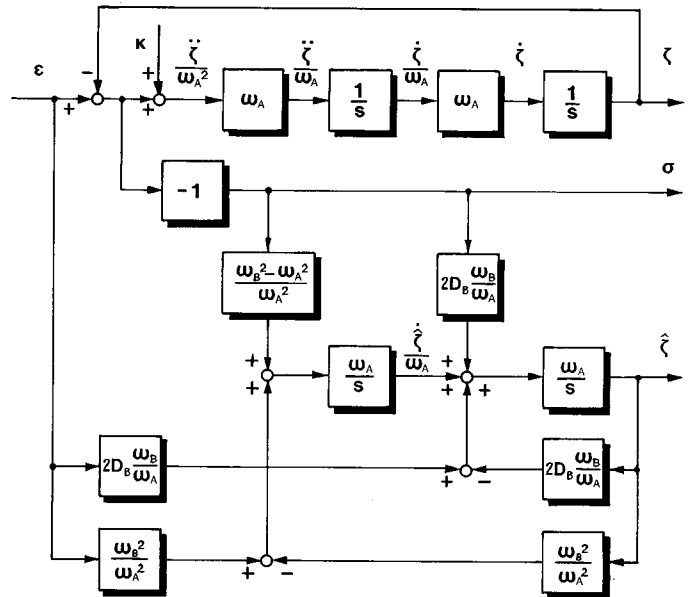


Bild 9. Signalflußbild für den elastischen Arm mit Beobachter.

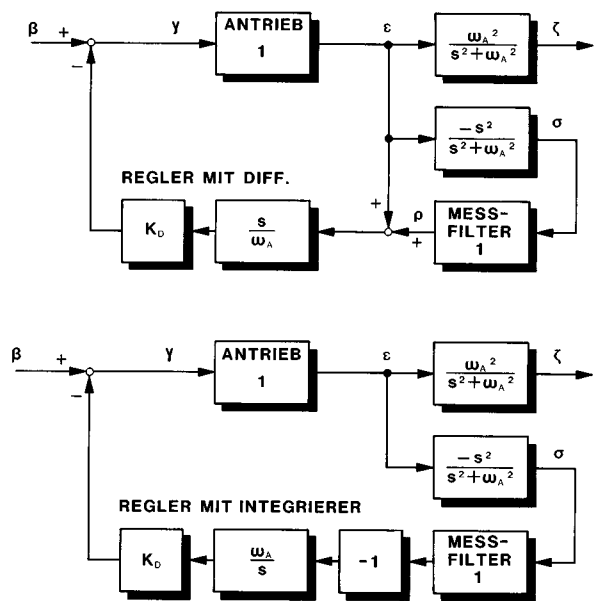


Bild 10. Signalflußbild für die Regelung mittels Differentiation und Integration.

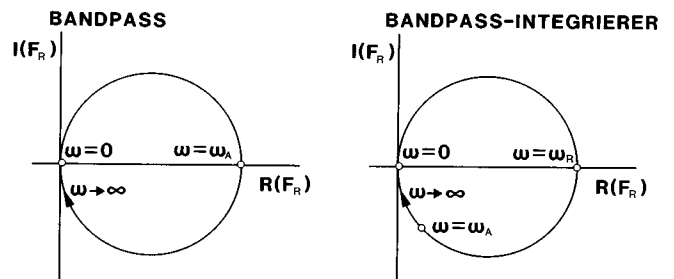


Bild 11. Bandpaß und Bandpaß-Integrierer.

die schnelle digitale Realisierung geeignet, und er ermöglicht sogar den Einsatz sehr niederfrequenter Meßfilter, so daß Aliasing-Fehler und unerwünschte hochfrequente Rückkopplungen zugleich vermieden werden. Wie schon erwähnt, werden Nullpunktfehler der Meßwerte beseitigt.

In Bild 9 sieht man folgenden Zusammenhang: Bei Abwesenheit der Störung κ ergibt sich die Beschleunigung zu $\ddot{\zeta} = \omega_A^2 \mu = -\omega_A^2 \sigma$. Hieraus folgt, daß anstelle des Dehnungsmeßwertes σ genauso gut der Meßwert μ der Handbeschleunigung verwendet werden darf, wenn man das Vorzeichen korrigiert. Für die Regelung mit dem Beschleunigungsmeßwert μ gilt dann:

$$\varepsilon = \beta - K_D \frac{\omega_A s}{s^2 + 2D_R \omega_R s + \omega_R^2} \mu. \quad (14)$$

Bisher wurde davon ausgegangen, daß der Winkel ε direkt kommandiert werden kann. Tatsächlich berechnet der Regler zunächst das Signal γ statt ε , und das Stellsystem erzeugt mit seiner Eigendynamik (und seinen Mängeln Spiel und Elastizität) den Winkel ε . Die dadurch entstehende Phasenverschiebung wurde oben tendenziell berücksichtigt.

Von anderer Seite wurde der Einwand erhoben, die Beschaffung der Geschwindigkeit mittels Beobachter wäre dem Bandpaß-Integrierer in jeder Hinsicht vorzuziehen. In Bild 9 sieht man unten einen vollständigen Beobachter. Zunächst muß aber geklärt werden, ob das System überhaupt beobachtbar ist. Verglichen mit üblichen Streckenstrukturen stellt man fest, daß mit σ keine Zustandsgröße, sondern eine Linearkombination aus der Eingangsvariablen und einer Zustandsgröße zur Verfügung steht. Die Anwendung formaler Kriterien gemäß den Ausführungen im Abschnitt „Beobachtbarkeit“ in [7] schafft sofort Klarheit: Das System ist beobachtbar. Der vollständige Luenberger-Beobachter in Bild 9 wurde ebenfalls nach [7] entworfen. Er hat die Eigenfrequenz ω_B und den Dämpfungsgrad D_B . Zur schnellen Synchronisation muß die Eigenfrequenz des Beobachters um ein Mehrfaches größer sein als die Eigenfrequenz des Arms. Hierdurch vergrößert sich die Bandbreite des Reglers beträchtlich, was ja in Hinsicht auf eine niedrige Abtastrate vermieden werden sollte.

Der Einfluß der Störung κ ist dann ein Problem, wenn sie nicht als Meßwert dem Beobachter zugeführt werden kann. Der Beobachter benötigt ohnehin schon zwei Meßwerte, der Bandpaß-Integrierer aber nur einen. Der Dehnungsmeßwert kann rauschen und eine Nullpunktdrift haben. Hierzu betrachte man eine Störung $\Delta\sigma$ für sonst verschwindende Variable ε , ζ , $\dot{\zeta}$. Man erhält das Übertragungsverhalten:

$$\dot{\zeta}/\omega_A = \frac{s(\omega_B^2 - \omega_A^2)/\omega_A - 2D_B \omega_B \omega_A}{s^2 + 2D_B \omega_B s + \omega_B^2} \Delta\sigma. \quad (15)$$

Günstig ist der Effekt, daß das Störsignal nicht aufgerauht wird. Die Beobachtung zählt eher zu den integrierenden als zu den differenzierenden Prinzipien. (In [7] wird mehrfach erwähnt, daß Beobachter mit zunehmender Eigenfrequenz differenzierend wirken. Dies gilt aber nur, wenn unter Verwendung von meßbaren Zustandsvariablen andere geschätzt werden sollen, die zu einer niedrigeren Integrationsstufe gehören.) Nachteilig ist allerdings der bleibende statische Übertragungsfaktor $-2D_B \omega_A/\omega_B$ bei konstanter Störung. Um in dieser

Hinsicht die Qualität des Bandpaß-Integrierers zu erreichen, müßte zusätzlich ein Hochpaß in Reihe geschaltet werden. Bekanntlich arbeitet ein Beobachter im Synchronlauf phasenfehlerfrei. Dieser ist aber zu Anfang nicht vorhanden und wird immer wieder durch Momente κ gestört. Insgesamt wird deutlich, daß die Vor- und Nachteile beider Prinzipien (Beobachter, Bandpaß-Integrierer) von Fall zu Fall abzuwägen sind.

4. Vollständiges Modell für die Simulation und Regelung

Bild 12 zeigt den Signalfluß für das vollständige System, und zwar für den Nickfreiheitsgrad mit Dehnungsaufschaltung und gleichermaßen für den Gierfreiheitsgrad mit Beschleunigungsaufschaltung, wenn statt des Dehnungsmeßwertes σ der Beschleunigungsmeßwert ($-\mu$) auf das Meßfilter geschaltet wird. Aus diesem Bild können, aufgrund der Indizierung, die Gleichungen für Simulations- und Regelungsprogramme direkt abgeschrieben werden.

Das Führungsfilter ist ein PT2-Glied mit Begrenzung der Regelabweichung. Hierdurch erhält man einen rampenartigen Übergang mit PT2-Kleinsignalverhalten. Dies entspricht einem gut eingestellten Servosystem mit Tachorückführung der Motorgeschwindigkeit. Man nimmt zunächst $\omega_F = \omega_A$ und paßt die Begrenzung den Gegebenheiten des Flex-Roboters an, so daß der elastische Arm auch bei sprungförmigen Sollwerten α nicht beschädigt wird.

Der Regler enthält den Bandpaß-Integrierer und zusätzlich im Nickfreiheitsgrad einen Integralanteil für die Regelabweichung ($\beta - \varepsilon$), da dieser Antrieb relativ weich ist und im Starrkörper-Regler kein Integralanteil vorgesehen ist. Mittels Integralanteil stellt sich die Wippe trotz Belastung der Hand in die richtige Position, die statische elastische Biegung der Hand wird aber nicht korrigiert. Der zugehörige Aufschaltfaktor K_I wurde experimentell optimiert und ist unproblematisch. Im Gierfreiheitsgrad müßte der Integralanteil mit $(\beta - \delta)$ gebildet werden, weil die Position auf der Motorwelle statt am Abtrieb gemessen wird, er ist aber überflüssig.

Der Arm ist ein dämpfungsloses PT2-System mit den Ausgängen ζ (nicht meßbar) und σ bzw. μ . Das Meßfilter ist ein PT2-Glied (Butterworth-Filter).

Der Stellantrieb besteht aus dem Servomotor mit idealem Getriebe und einem nachgeschalteten realen Getriebe (1:1) mit Spiel und Elastizität. Der Starrkörper-Regler ist schon enthalten; die Funktion der Begrenzung wurde beim Führungsfilter erläutert. Bild 13 zeigt das mechanische Modell für das Stellsystem. Der Servomotor mit idealem Getriebe folgt dem Eingangssignal (unter Berücksichtigung der nicht gezeichneten Begrenzung) im Großen rampenartig, im Kleinen mit PT2-Verhalten. Aufgrund der Tachorückführung auf der Motorwelle wirkt die Dämpfung relativ zum Inertialsystem. Der Antrieb ist über zwei gedämpfte Federpuffer mit Spiel angekopfelt. Dies entspricht qualitativ den Anschlägen

5. Rechentechnische Realisierung

Der Experimentierplatz besteht, abgesehen vom FlexRoboter, aus zwei Personalcomputern und drei MIMOS-Prozeßrechnern. Das MIMOS-System (Prozessor 8086), nämlich die Hardware, das Echtzeit-Betriebssystem und die Software für die Behandlung dynamischer Systeme im Zustandsraum, wurde bereits in den Jahren 1980 bis 1984 im damaligen Ingenieurbüro des Verfassers entwickelt [11]. Jeder MIMOS-Rechner integriert einen Satz von acht Differentialgleichungen und acht gewöhnlichen Gleichungen; je acht analoge Eingänge und Ausgänge sind verfügbar. Für die Anwendung am Flex-Roboter beträgt die Abtastrate 150 Hz, niedrigere Werte können ohne jede Umrechnung eingestellt werden.

Einer der Personalcomputer fungiert als Leitreechner: hier werden die Regelungsaufgaben aufbereitet und via IECBus an die MIMOS-Rechner verteilt. Der zweite Personalcomputer erzeugt die Sollbahnen und erfaßt die Meßdaten für die Dokumentation der Ergebnisse. Außerdem wird hier die Off-line-Simulation ausgeführt.

Regler werden grundsätzlich als simulierte Matrix-Differentialgleichungen anstelle von Abtastalgorithmen installiert. Der Verfasser hat für die Übertragung kontinuierlicher Systeme in Abtastsysteme sogar ein eigenes Verfahren [10] entwickelt, er bevorzugt aber – insbesondere in der Lehre – die erstgenannte Methode.

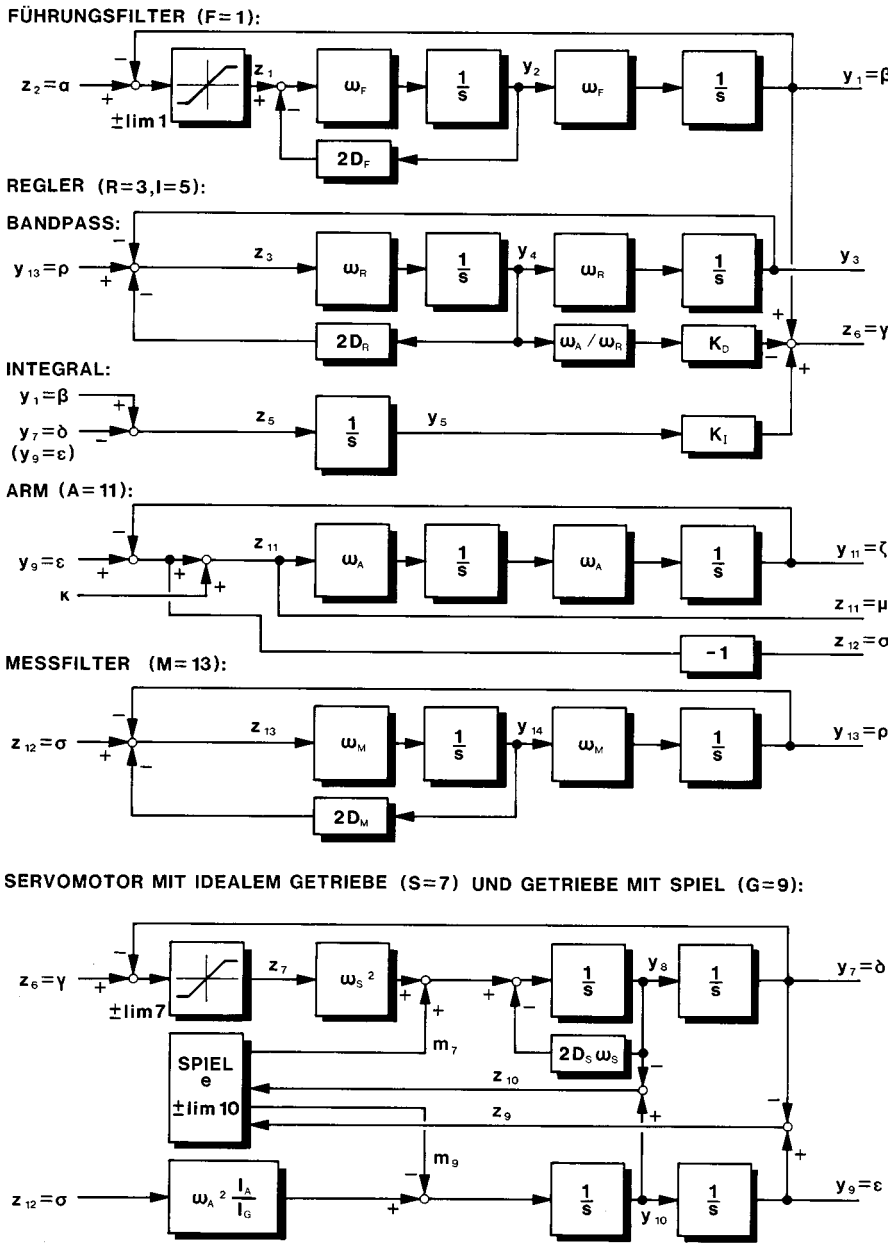


Bild 12. Signalfußbild für eine Achse des Flex-Roboters.

an den Flanken der Zahnräder im Getriebe. Das Modell eröffnet die Möglichkeit, das Getriebespiel überhaupt zu erfassen, die Modellbildung muß nicht „genau“ sein. Am Abtrieb befindet sich, nur über eine Feder angekoppelt, die Hand.

Auf weitere Details wird verzichtet, nur muß folgender Umstand erwähnt werden: Da der Servoantrieb zeitweise im Spiel läuft, sind seine Kennfrequenz ω_s und sein Dämpfungsgrad höher als beim gesamten Stellsystem, zum Beispiel um den Faktor 1,4, wenn der Antrieb beschleunigungsoptimal ausgelegt wurde. Sodann ist die Rückwirkung der Armbiegung auf den Abtrieb zu berücksichtigen. Dieser Einfluß ist nur wichtig (vorausgesetzt, der Antrieb ist nicht unterdimensioniert), wenn sich der Abtrieb innerhalb des Spiels frei bewegt, wie weiter unten bei der Erörterung des regelungstechnischen Verhaltens infolge Getriebespiels erörtert wird. Liegen die Zahnflanken an, so ist beim Flex-Roboter im Gierantrieb die Rückwirkung belanglos.

Mit diesem einheitlichen Konzept lassen sich Strukturen nach Bild 12 sofort in die Off-line-Simulation und in digitale oder analoge Regler umsetzen.

Im Anschluß an die Off-Line-Simulation wurden sämtliche Regelungsalgorithmen am Flex-Roboter auf Analog-

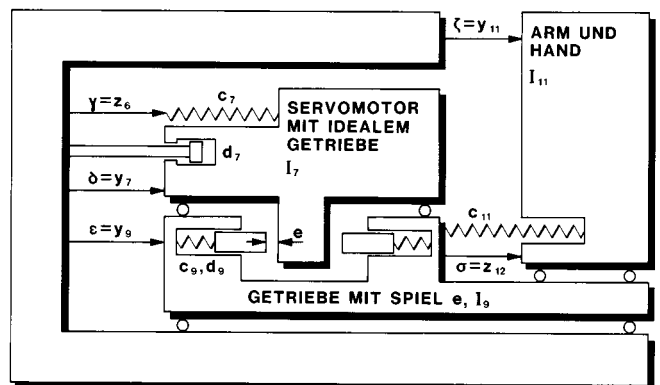


Bild 13. Modell für einen Stellantrieb mit Getriebespiel.

rechnern erprobt und danach auf den MIMOS-Rechnern installiert, was aufgrund der konformen Struktur sehr schnell geht. Das Ändern von Parametern via Leitrechner ist dann aber zeitraubend und gestattet dem Anwender kaum, anders als beim Analogrechner, das intuitive Erfassen wesentlicher Systemeigenschaften.

6. Ergebnisse

a) Hauptergebnisse

Bild 14 zeigt in der Simulation die Verhältnisse am Nickantrieb mit und ohne Regler. Das Führungfilter erzeugt aus dem Eingangssprung eine Rampe mit PT2-Übergang. Links in den Bildern sind alle maßgeblichen Parameter notiert. Das beträchtliche Überschwingen der Position der Hand ist nur vermeidbar, wenn man den Hochpaß im Bandpaß-Integrierer wegläßt. Aus der meßtechnischen Forderung, Nullpunktfehler zu unterdrücken, resultiert die nicht ganz optimale Regelungsdynamik.

Die folgenden Grafiken, Bild 15 und Bild 16, zeigen oben Simulationsergebnisse und unten Meßergebnisse am Flex-Roboter. In Bild 15 wird eine vertikale Auslenkung

der Hand von 6 cm erzeugt, in Bild 16 ein Drehwinkel von 60°. Beim Gierantrieb ist die Übereinstimmung sehr gut, beim Nickantrieb aber nicht ganz befriedigend. Änderungen an den Parametern des linearen Teils des Streckenmodells und an den internen Begrenzungen brachten keine Verbesserungen. Das Regelungskonzept erfordert ja nur grobe Kenntnisse, z. B. die Eigenfrequenzen des Arms, und es ist weitgehend unempfindlich gegen Änderungen an der Strecke. Die Position der Hand ist zur Zeit nicht meßbar, daher kann nur die Position der Wippe beim Nickantrieb und der Motorwelle beim Gierantrieb (umgerechnet auf den Abtrieb) zum Vergleich herangezogen werden. Bild 15 gilt für den Nickfreiheitsgrad mit Integralregler ohne Getriebeispiel, Bild 16 für den Gierfreiheitsgrad mit Getriebeispiel. Elastizität hat das Getriebe in allen Fällen.

Bei der Beurteilung der Führungsgüte muß beachtet werden, daß die Eigenfrequenzen des Arms mit 1,5 Hz bzw. 3 Hz außergewöhnlich niedrig sind, während die Sollwertrampen vergleichsweise (auch für starre Roboter) schnelle Bewegungen kommandieren. In der Beschleunigungsphase kann die Kraft an der Hand nur über die Verbiegung des Arms aufgebracht werden, eine deutliche Regelabweichung ist daher unvermeidlich.

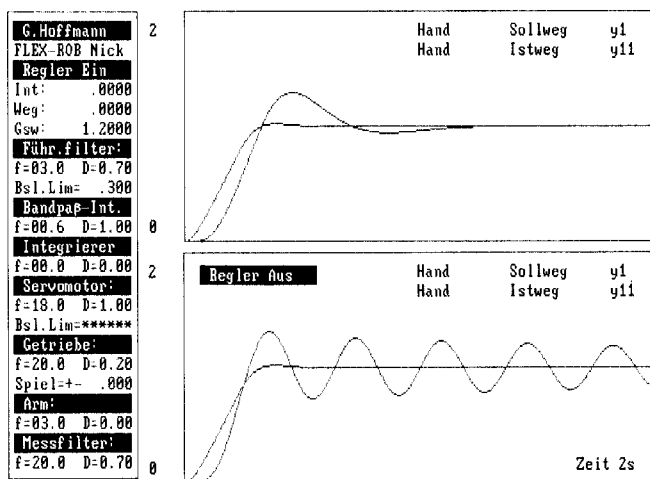


Bild 14. Simulierte Sprungantworten im Nickantrieb mit und ohne Regler.

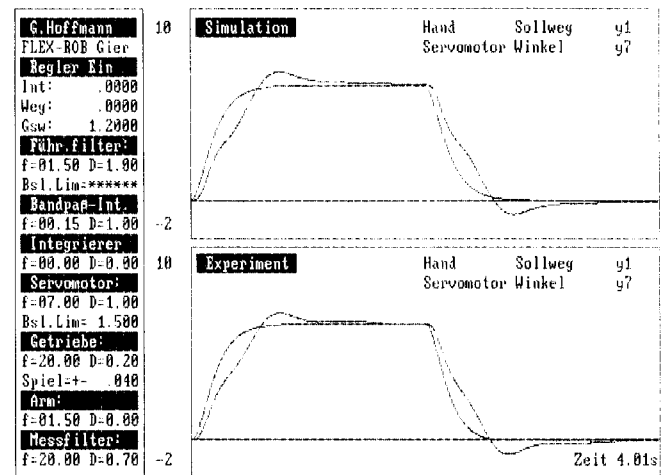


Bild 16. Simulation und Experiment für den Gierantrieb (Motorwinkel).

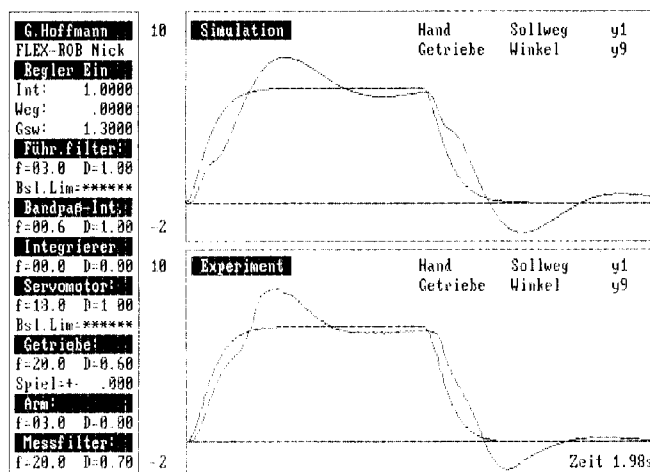


Bild 15. Simulation und Experiment für den Nickantrieb (Wippenwinkel).

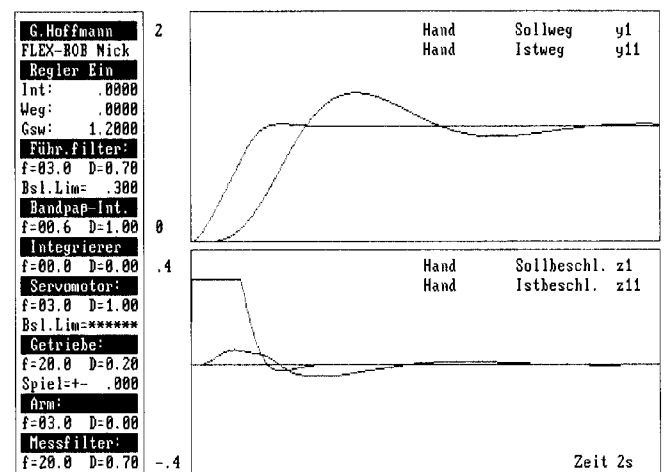


Bild 17. Simulation für den Nickantrieb mit langsamen Stellantrieb.

b) Einfluß der Stellmotordynamik

In Bild 17 sieht man die Simulation für den Nickfreiheitsgrad (Eigenfrequenz 3 Hz) wobei die Kennfrequenz des Servomotors nur noch 3 Hz statt 18 Hz beträgt, die übrigen Parameter aber Bild 16 entsprechen. Die Schwingungsdämpfung ist noch brauchbar. Das Stellsystem muß also nicht wesentlich schneller sein als die elastische Schwingung. Dies ist wichtig für die nachträgliche Einführung von Dämpfern in Systeme, die nur über Starrkörperregler verfügen.

c) Einfluß des Getriebespiels

In Bild 18 sieht man die Simulation des Gierantriebs mit stark übertriebenem Getriebespiel. Entgegen der Erwartung tritt *keine* Grenzykelschwingung auf, was auch im Experiment durchgehend bestätigt wird. Diese günstige Eigenschaft läßt sich so erklären: Schwingt die Hand bei festgehaltener Motorwelle, dann bewegt sich der Drehteller aufgrund der elastischen Kopplung im Spiel, bis sich die Zahnflanken berühren. Beim Eingriff des Reglers ist das Spiel scheinbar nicht vorhanden. Dies gilt nicht für ganz beliebige Parameter. Insbesondere ist das Verhältnis der Trägheitsmomente I_{11}/I_9 (mit $I_A = I_{11}$, $I_G = I_9$ in Bild 13) von Bedeutung: der günstige Effekt geht verloren, wenn das Trägheitsmoment der Hand um die kinematische Achse zu klein wird.

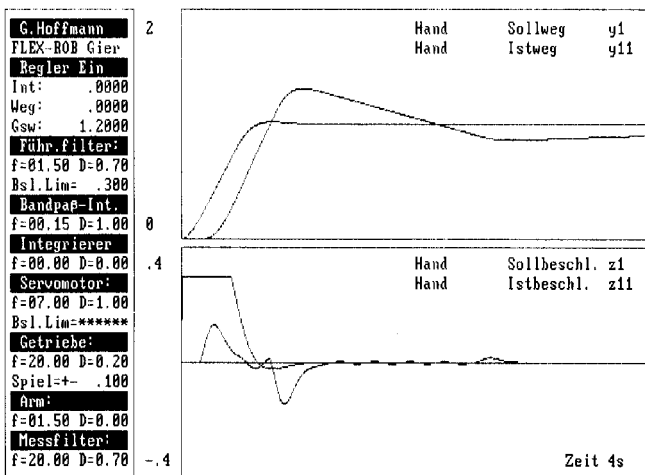


Bild 18. Simulation für den Gierantrieb mit großem Getriebespiel.

d) Einfluß des Meßfilters

Die Meßfilter sind in der Simulation von zweiter Ordnung, im Experiment dagegen nur von erster, wobei aber berücksichtigt werden muß, daß die Sensoren nebst Verstärker und die im AD-Umsetzer eingebauten Alia-

sing-Filter ebenfalls Phasendrehungen verursachen. Normalerweise liegt die Eckfrequenz der Meßfilter beim fünf- bis zehnfachen der Armfrequenz. Die Wahl ist nicht kritisch, muß aber in der gesamten Auslegung berücksichtigt werden. Praktisch geschieht dies durch die Anpassung der Eckfrequenz des Bandpaß-Integrierers.

e) Empfindlichkeit der Reglerparameter

Der wesentliche Faktor K_D kann von Null bis zum doppelten Nominalwert verstellt werden, ohne daß Instabilitäten auftreten. Bei zu großen Werten findet der Ausgleich nach dem ersten Überschwinger schleichend statt.

Im Gierfreiheitsgrad erhält man bei weiterer Vergrößerung von K_D eine Instabilität infolge Einkopplung des Beschleunigungsmeßwertes in die Torsionsschwingung der Hand. Die Eckfrequenz des Bandpaß-Integrierers soll zwischen 10% und 20% der Eckfrequenz der Armschwingung liegen.

Im Nickfreiheitsgrad (Eigenfrequenz 3 Hz) darf die Abtastrate von 150 Hz auf 30 Hz bei noch brauchbarem Verhalten gesenkt werden. Erst unter 20 Hz entstehen selbsterregte Schwingungen. Somit kann der relativ schnelle MIMOS-Prozeßrechner in Zukunft durch einen Personalcomputer ersetzt, und die Regelung in einer Hochsprache programmiert werden.

7. Zusammenfassung

Für die Dämpfung elastischer Gier- und Nickschwingungen eines Roboterarms wurden Reglerkonzepte für Digitalrechner entwickelt, die nur geringe Anforderungen an die Rechnergeschwindigkeit stellen und außerordentlich robust sind, so daß das System nicht sehr genau identifiziert werden muß. Bei gleichbleibender Reglerstruktur können Beschleunigungssensoren oder Dehnungssensoren verwendet werden. Ein wesentliches Ergebnis ist auch darin zu sehen, daß die Regler nur einen Signaleingang benötigen, wodurch der nachträgliche Einbau in Systeme mit Starrkörperregelung ohne große Eingriffe vonstatten gehen kann.

Nicht behandelt wurde das Problem allgemeiner räumlicher Bewegungen mehrachsiger Roboter.

Der Verfasser dankt den Herren Diplomingenieuren *Jan Bülthuis* (Konstruktion und Bau des Flex-Roboters), *Peter Barth* (Grafiken) und *Ulrich Hemker* (Fotos). Der Verfasser dankt weiterhin der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung und den Gutachtern für ihre Mühe.