

(12) Wirtschaftspatent

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1 Patentgesetz

(19) DD (11) 221 953 A1

4(51) B 23 Q 15/02

## AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) WP B 23 Q / 260 931 3

(22) 15.03.84

(44) 08.05.85

(71) Akademie der Wissenschaften der DDR, 1086 Berlin, Otto-Nuschke-Straße 22/23, DD

(72) Palm, Rainer, Dr.-Ing.; Simmat, Eckard, Dipl.-Ing.; Wüntke, Roland, Dipl.-Ing.; Löscher, Volker, Dr.-Ing., DD

(54) Regelungsverfahren und Anordnung zur Abtastung und Bearbeitung von Konturen

(57) Die Erfindung hat die Regelung eines Bearbeitungs- oder Abtastvorgangs von Konturen mit Hilfe einer Bearbeitungsmaschine, eines Industrieroboters oder Manipulators zum Ziel. Dieses wird dadurch erreicht, daß bezüglich einer grob vorgegebenen Kontur sowohl die Vorschub- als auch die Zustellbewegung unter Berücksichtigung der Toleranzen des Abtastwerkzeugs und der Kontur kontinuierlich korrigiert werden. Das Verfahren basiert auf einer Kraftregelung, wobei die Informationen über die Reaktion zwischen Werkzeug und Kontur ein Kraft-Momentensensor liefert. Aus den mit dem Sensor gemessenen Kräften werden durch eine entsprechende Transformation die Reaktionskräfte auf der Kontur ermittelt und mit entsprechenden Sollwerten verglichen. Mit Hilfe vorgegebener Kraftschwellen erfolgt eine Auswahl der Regelungsart in der Weise, daß entweder die Vorschubgeschwindigkeit oder die Zustellbewegung geregelt wird. Bei zu großen Kraftabweichungen wird der Regelungsvorgang gestoppt. Die aus der Soll-Istwert-Abweichung der Kräfte ermittelte Wegdifferenz wird in das Bezugssystem der Verarbeitungsmaschine transformiert und die daraus resultierende Bewegungskorrektur ausgeführt. Danach erfolgt ein erneuter Regelungszyklus. Fig. 2

Regelungsverfahren und Anordnung zur Abtastung und  
Bearbeitung von Konturen

### Anwendungsgebiet der Erfindung

Das Anwendungsgebiet der Erfindung betrifft Schleif- und  
Entgratprozesse und andere Bearbeitungsweisen wie das Fräsen  
oder Hobeln sowie Abtastprozesse von Konturen unter Verwendung  
von Kraft-Momenten-Sensoren insbesondere unter Einsatz von  
Industrierobotern und Manipulatoren.

### Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Die in der Literatur, insbesondere Patentliteratur, angegebenen  
Verfahren zur Regelung von Bearbeitungsvorgängen lassen sich  
in zwei Gruppen teilen:

1. Verfahren, die eine Vielzahl von Sensoren benutzen, wie  
Abstandssensoren, Leistungs- und Strommesser, Kraft- und  
Momenten-Sensoren, elektronische Sensoren (Schwingkreise,  
kapazitive Sensoren), optische Sensoren usw.
2. Verfahren mit ausschließlichem Gebrauch von Kraft-Momenten-  
Sensoren

Diese Verfahren konzentrieren sich entweder auf die Regelung  
der Vorschubgeschwindigkeit, der Drehzahl von Werkzeugantrieben  
(Spindeldrehzahl beim Schleifen) oder der Zustellbewegung.  
Ein Verfahren zur Regelung der Vorschubgeschwindigkeit mit  
Ermittlung der Tangentialkraft über die elektrische Leistungs-  
aufnahme des Werkzeugspindelmotors beschreibt DE-OS 2931940.  
Mit einem Verfahren zur adaptiven Regelung von Werkzeugmaschinen  
befaßt sich die DE-OS 2018424, wobei der Arbeitsvorschub  
solange verändert wird, bis eine vom Verformungsmoment abhängige  
Größe einen Schwellwert erreicht hat. Die DE-PS 2519735 stellt  
ein Verfahren vor, bei der das Werkstück während der Bearbei-  
tung gemessen wird, wobei die Vorschubgeschwindigkeit in  
Abhängigkeit von einer variablen Größe programmiert wird. Ein  
von den elastischen Verformungen abhängiges Signal regelt die  
Vorschubgeschwindigkeit. In der US-PS 3029962 wird ein Ver-  
fahren vorgestellt, bei dem Strom, Spannung und Drehzahl des  
Spindelmotors einer Werkzeugmaschine erfaßt werden und diese

als Regelgrößen benutzt werden.

In den Patentschriften DE-OS 3103166, DE-PS 2442820 und DE-PS 2100363 werden Regelvorrichtungen beschrieben, bei denen Abstands- bzw. Fertigungsmaße regeltechnisch verarbeitet werden. Ebenfalls mit der Abstandsregelung beschäftigt sich die DE-PS 2333089, bei der der Abstand zwischen Werkzeug und Werkstückoberfläche mit Hilfe eines elektronischen Fühlers, der auf Schwingkreisbasis arbeitet, gemessen wird. Mit dem Entgraten durch einen robotergeführten Fräser beschäftigt sich DE-OS 2824266, wobei sich der Fräuserschaft direkt auf die Grundkontur des zu bearbeitenden Werkstückes abstützt.

Die beschriebenen Verfahren haben den Nachteil, daß sie (in der Regel) entweder nur die Vorschubgeschwindigkeit oder die Zustellbewegung regulieren.

In der DE-OS 1803742 wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem die Vorschubgeschwindigkeit und die Zustellbewegung in Abhängigkeit von der gemessenen Verformungsleistung  $M$  verändert werden. Bei Überschreiten bzw. Unterschreiten eines Wertes  $M_{\max}$  wird die Bearbeitungstiefe entsprechend verringert bzw. erhöht. Wird ein Wert  $M_{\max} + \Delta$  erreicht, so wird die Vorschubbewegung gestoppt und die Bearbeitungstiefe weiter verringert. Wird ein Wert  $M_{\max} - \Delta$  erreicht, so wird die Kontur im Eilvorschub abgefahren. Die Oberfläche wird mehrfach bearbeitet, bis die endgültige Kontur erreicht ist. Das beschriebene Verfahren hat den Nachteil, daß die Vorschubgeschwindigkeit diskontinuierlich zwischen Eilvorschub, Arbeitsvorschub und Stop-Zustand geändert wird.

In der DE-AS 2147522 wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem ein Belastungssollwert  $B$  vorgegeben wird. Bei Überschreiten bzw. Unterschreiten von  $B_{\text{soll}}$  erfolgt eine kontinuierliche Verringerung bzw. Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit  $v$ . Ist ein Wert  $v_{\min}$  erreicht, so wird die Sollbelastung  $B_{\text{soll}}$  reduziert und entsprechend dieser Sollbelastung  $B_{\text{soll}}$  die Schnitttiefe mit Beibehaltung von  $v_{\min}$  reduziert. Wurde die reduzierte Sollbelastung  $B_{\text{soll,r}}$  erreicht, so wird als Belastungswert der ursprüngliche Wert  $B_{\text{soll}}$  vorgegeben.

und mit reduzierter Schnitttiefe die Vorschubgeschwindigkeit erhöht. Dieses Verfahren hat den Nachteil, daß es die Schnitttiefe nur in eine Richtung korrigiert. Weiterhin ist zusätzlich zur Belastungsinformation eine Geschwindigkeitsinformation erforderlich. Außerdem haben die letztgenannten Verfahren den Nachteil, daß man die erforderliche Kontur sehr genau kennen muß. Ungenügend bekannte Konturen können daher nicht bearbeitet werden bzw. abgetastet werden.

#### Ziel der Erfindung

Die Erfindung verfolgt das Ziel, die bekannten technischen Lösungen dahin zu verbessern, daß ein geschlossenes Regelungskonzept zur kontinuierlichen Korrektur der Abtastgeschwindigkeit bzw. Vorschubgeschwindigkeit sowie der Abtasthöhe oder Spantiefe, Grathöhe mit Berücksichtigung der Toleranzen des Abtastwerkzeuges und der zu bearbeitenden Oberflächenkontur entwickelt wird.

#### Darlegung des Wesens der Erfindung

Die Erfindung hat die Aufgabe, eine Regelung für einen Bearbeitungs- oder Abtastvorgang von Konturen durch eine Maschine, einen Industrieroboter oder Manipulator mit Hilfe eines Kraft-Momentensensors so zu schaffen, daß unter Berücksichtigung der Toleranzen des Abtastwerkzeuges und der zu bearbeitenden Oberflächenkontur sowohl die Vorschub- als auch die Zustellbewegung bezüglich einer grob vorgegebenen Bahn kontinuierlich korrigiert werden.

Hierbei ist es prinzipiell unerheblich, ob das Werkzeug oder das Werkstück geführt wird bzw. an welcher Stelle der geschlossenen kinematischen Kette der Kraft-Momentensensor montiert ist. Für einen Schleif- oder Fräsprozeß ergibt sich aus geometrischen und technologischen Überlegungen die Reaktionskraft  $\underline{F}$  zwischen Werkzeug und Werkstück zu  $\underline{F} = \underline{K}_1 \cdot v \cdot h$ , wobei  $v$  die Vorschubgeschwindigkeit an der Oberfläche,  $h$  die abzutragende Grathöhe bzw. Spantiefe und  $\underline{K}_1$  ein Koeffizientenvektor ist. Für Abtastvorgänge, bei denen die Vorschubgeschwindigkeit  $v$  vernachlässigt werden kann, gilt die Modellgleichung

$$\underline{F} = K_2 \cdot \underline{\Delta x},$$

wobei  $\underline{\Delta x}$  der durch die Kraft  $\underline{F}$  hervorgerufene Weg der nachgebenden Oberfläche ist und  $K_2$  einen Steifigkeitsfaktor darstellt. Da der Abtastvorgang offensichtlich ein Sonderfall eines Bearbeitungsprozesses ist, kann die Regelungsaufgabe so formuliert werden, daß bei Vorgabe einer Reaktionskraft  $F_{\text{soll}}$  die vorgegebene Bahnkurve  $\underline{x}(t)$  sowohl über die Vorschubgeschwindigkeit  $v$  als auch über die Spantiefe  $h$  (bzw. ausschließlich die Abtasthöhe  $\underline{\Delta x}$ ) korrigiert wird.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß

1. die Bahnkurve des Bearbeitungswerkzeugs entlang der Oberflächenkontur grob vorgegeben wird,
2. die erforderliche Normalkomponente der Reaktionskraft im Koordinatensystem des Referenzpunktes an der Oberfläche angegeben wird,
3. die Sensorsignale des Kraft-Momentensensors erfaßt werden, wobei diese Signale die im Koordinatensystem des Sensors wirkenden Kraftkomponenten darstellen,
4. die tatsächlich wirkende Normalkomponente der Reaktionskraft im Referenzsystem aus den Sensorsignalen ermittelt wird,
5. die Soll-Istwert-Differenz der Kräfte aus Verfahrensschritt 2 und 4 gebildet wird,
6. die Soll-Istwert-Differenz der Normalkräfte mit einem vorgegebenen Umschaltenschwellwert verglichen wird. Wird dieser Schwellwert überschritten, so wird die Soll-Istwert-Differenz mit einer Havarieschwelle verglichen. Wurde die Havarieschwelle überschritten, so wird der Regelungsvorgang gestoppt;
7. bei Nichtüberschreitung der Havarieschwelle aus der Soll-Istwert-Differenz der Normalkräfte eine Wegkorrektur normal zur Oberfläche im Referenzsystem ermittelt wird, was einer Korrektur der Zustellbewegung entspricht,

8. bei Nichtüberschreitung des Umschaltenschwellwertes aus Schritt 6 die tatsächlich wirkende Tangentialkomponente der Reaktionskraft im Referenzsystem aus den Sensorsignalen ermittelt wird,
9. aus den tatsächlich wirkenden Kraftkomponenten aus Schritt 4 und 8 und der vorgegebenen Sollkraft aus Schritt 2 die erforderliche Sollkomponente für die Tangentialkraft im Referenzpunkt ermittelt wird,
10. die Soll-Istwert-Differenz der Tangentialkräfte aus Schritt 8 und 9 gebildet wird,
11. aus der Soll-Istwert-Differenz der Tangentialkräfte aus Schritt 10 eine Wegkorrektur tangential zur Oberfläche im Referenzsystem ermittelt wird, was einer Korrektur der Vorschubgeschwindigkeit entspricht,
12. die Wegkorrektur im Referenzsystem aus Schritt 7 bzw. 11 in Weg- bzw. Winkelkorrekturen bezüglich des Koordinatensystems der Bearbeitungsmaschine umgewandelt werden.

Die auftretende Soll-Istkraft-Differenz wird günstig dadurch ausgeregelt, daß jeweils eine solche Kraftänderungsgeschwindigkeit erzeugt wird, die der Soll-Istkraft-Differenz proportional ist.

In vorteilhafter Auskleidung wird dieses Verfahren so realisiert, daß

1. die geplante Bahnkurve als Folge von Stützpunkten und Zeitintervallen entlang der Oberflächenkontur vorgegeben wird,
2. innerhalb der vorgegebenen Stützpunkte durch lineare Interpolation Zwischenpunkte erzeugt werden, die innerhalb eines festen Zeitintervalls durchlaufen werden,
3. diese Zwischenpunkte durch die oben angegebenen 12 Verfahrensschritte korrigiert werden,
4. die im vorhergehenden Stützpunktintervall entstandene Korrektur der Zwischenpunkte in dem aktuell abzuarbeitenden Intervall berücksichtigt wird,

5. im Falle des Überschreitens der Havarieschwelle das Bearbeitungswerkzeug in eine über der Oberflächenkontur befindliche Parkposition gebracht wird.

Eine Schaltungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens wird dadurch realisiert, daß die Ausgänge eines Kraft-Momentensensors an die Eingänge einer ersten Rechenschaltung geführt werden. Deren Ausgang wird zusammen mit dem Ausgang einer Sollkraftquelle auf ein erstes Subtraktionsglied geschaltet, dessen Ausgang mit dem Eingang eines Betragsbildners verbunden ist. Der Ausgang des Betragsbildners und der Ausgang einer Umschaltswellwertquelle werden auf die Eingänge eines ersten Komparators geschaltet, wobei die Umschaltswellwertquelle auf den Minuseingang des ersten Komparators geschaltet wird. Der Q-Ausgang des ersten Komparators ist mit dem Toreingang eines zweiten Komparators verbunden, dessen Plus- bzw. Minuseingang mit dem Ausgang des Betragsbildners bzw. dem Ausgang einer Havarieschwellwertquelle verbunden ist.

Der Ausgang des zweiten Komparators ist an den Eingang einer Havarieschaltung angeschlossen. Der negierte Ausgang des zweiten Komparators ist mit dem Tor eines Analogschalters verbunden, dessen Eingang mit dem Ausgang des ersten Subtraktionsgliedes verbunden ist. Der Ausgang des Analogschalters führt auf den Eingang eines ersten Verstärkers, dessen Ausgang an dem ersten Eingang der zweiten Rechenschaltung angeschlossen ist.

Die Ausgänge des Kraft-Momentensensors sind außerdem an die Eingänge einer dritten Rechenschaltung geführt, deren Torleitung mit dem negierten Ausgang des 1. Komparators verbunden ist. Der Ausgang der dritten Rechenschaltung ist an dem ersten Eingang einer vierten Rechenschaltung und an den Minuseingang eines zweiten Subtraktionsgliedes angeschlossen. Der zweite Eingang der vierten Rechenschaltung ist mit dem Ausgang der ersten Rechenschaltung verbunden.

Der dritte Eingang der vierten Rechenschaltung ist an den Ausgang der Sollkraftquelle geführt. Der Ausgang der vierten Rechenschaltung ist mit dem Plusseingang des zweiten Subtraktionsgliedes verbunden. Dessen Ausgang führt auf den Eingang

eines zweiten Verstärkers, dessen Ausgang mit dem zweiten Eingang der zweiten Rechenschaltung verbunden ist.

Die Ausgänge der zweiten Rechenschaltung führen zusammen mit Ausgängen einer Sollbahnquelle auf die Eingänge einer Summierschaltung, deren Ausgänge an die Bahnkurveneingänge der Bearbeitungsmaschine angeschlossen sind. Die Bahnkurvenausgänge sind mit den Parametereingängen der zweiten Rechenschaltung verbunden. Die Eingänge PHI der 1., 2. und 3. Rechenschaltung sind an den Ausgang PHI für den Anstellwinkel eines Steuerwerkes angeschlossen. Der Taktausgang des Steuerwerkes ist an Takteingänge der dritten Rechenschaltung, des zweiten Komparators und des Analogschalters angeschlossen. Der Bahnkurvenausgang des Steuerwerkes ist mit dem Eingang der Sollbahnquelle verbunden.

Der funktionelle Inhalt der ersten bis vierten Rechenschaltung besteht in folgenden Punkten:

1. Rechenschaltung: Transformation der Signale im Sensorkoordinatensystem in ein Signal, das der Normalkraft im Referenzsystem entspricht
2. Rechenschaltung: Transformation der Signale, die räumlichen Korrekturwerten bezüglich der Oberflächenkontur entsprechen, in Signale, die eine Bewegungsänderung der Bearbeitungsmaschine hervorrufen
3. Rechenschaltung: Transformation der Signale im Sensorkoordinatensystem in ein Signal, das der Tangentialkraft im Referenzsystem entspricht
4. Rechenschaltung: Berechnung des Tangentialsollkraftsignals aus dem Normalsollkraftsignal und den in der ersten und dritten Rechenschaltung ermittelten Signalen.

Das dem Verfahren zugrundeliegende Regelgesetz besteht in der Forderung nach der Proportionalität zwischen Soll-Istkraftdifferenz und einer Kraftänderungsgeschwindigkeit, die erforderlich ist, um diese Differenz asymptotisch gegen Null gehen zu lassen. Die aus diesem Gesetz resultierenden Wegkorrekturen werden entweder normal oder tangential zur

Oberflächenkontur an dem geplanten Bahnverlauf angebracht. Eine gleichzeitige Korrektur beider Richtungen wird durch die ausschließliche Verwendung eines Kraft-Momentensensors ausgeschlossen. Es wird daher von einer Korrekturrichtung auf die andere mittels einer Schwellwertlogik (erster Komparator) umgeschaltet. Da Normal- und Tangentialkraft voneinander linear abhängen, wird zum Schwellwertvergleich nur die Normalkraftdifferenz herangezogen. Befindet sich die Normalkraftdifferenz unterhalb der Umschaltchwelle, so wird mit Hilfe der dritten und vierten Rechenschaltung und der zweiten Subtraktionsschaltung das Tangentialkraftdifferenzsignal ermittelt. Andernfalls erfolgt die Durchschaltung des schon ermittelten Normalkraftdifferenzsignals. Je nach Schaltzustand des ersten und zweiten Komparators wird aus den gewonnenen Differenzsignalen mittels der ersten oder zweiten Verstärkerschaltung sowie der zweiten Rechenschaltung eine Bewegungskorrektur der Bearbeitungsmaschine hervorgerufen, die einer Normalkorrektur (Spantiefe) oder Tangentialkorrektur (Vorschubgeschwindigkeit) entspricht. Diese Korrekturen rufen ihrerseits Kraftänderungen zwischen Oberfläche und Werkzeug und damit im Sensor hervor, die mit einem neuen Regelzyklus ausgeregelt werden.

#### Ausführungsbeispiel

Die Erfindung wird nachfolgend in einem Ausführungsbeispiel näher erläutert. Die dazugehörigen graphischen Darstellungen zeigen in

Fig. 1: einen Industrieroboter mit fünf Freiheitsgraden als spezieller Bearbeitungsmaschine in Reaktion mit einer Oberflächenkontur

Fig. 2: das Prinzipblockschaltbild des erfindungsgemäßen Verfahrens mit Schaltungsanordnung am Beispiel eines zweikomponentigen Kraftsensors

Fig. 3: Kraftschwelle für h- und v-Regelung

Als Beispiel einer Bearbeitungsmaschine soll ein Industrieroboter IR mit fünf Freiheitsgraden nach Fig. 1 dienen, an

dessen Handgelenk ein Bearbeitungswerkzeug W verbunden mit einem zweikomponentigen Kraftsensor SE montiert ist. Dieses Werkzeug W tastet die Oberflächenkontur mit der Tangentialgeschwindigkeit  $v$  mit einer gewissen Andruckkraft ab, wobei im Referenzpunkt R eine Reaktionskraft auftritt, die sich innerhalb des Koordinatensystems  $K_q$  mit dem Basisvektor  $\underline{x}_q = (x_{q1}, x_{q2}, x_{q3})^T$  in die Normalkraft  $F_{q1}$  und die Tangentialkraft  $F_{q3}$  zerlegt.

Diese Kräfte werden im Sensorkoordinatensystem  $K_p$  mit dem Basisvektor  $\underline{x}_p = (x_{p1}, x_{p2}, x_{p3})^T$  als  $F_{p1}$  und  $F_{p3}$  gemessen, wobei vorausgesetzt wird, daß die Achsen  $x_{q2}$  und  $x_{p2}$  parallel zueinander sind. Der Industrieroboter hat ein Grundkoordinatensystem  $K_x$  mit dem Basisvektor  $\underline{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ , und er besitzt Gelenkkordinaten  $\alpha$  für den Fuß,  $\beta$  für den Unterarm,  $\gamma$  für den Oberarm,  $\delta$  für die Handvertikaldrehung und  $\epsilon$  für die Handhorizontaldrehung. Die Verdrehung der Koordinatensysteme  $K_q$  und  $K_p$  gegeneinander ist in diesem ebenen Beispiel durch den Winkel  $\varphi$  gegeben, während die Verdrehung der Koordinatensysteme  $K_q$  und  $K_x$  gegeneinander durch die Winkel  $\alpha$ ,  $\gamma$  und  $\epsilon$  bestimmt ist. Ausgangspunkt des erfindungsgemäßen Verfahrens ist das Regelgesetz

$$\dot{\underline{F}}_q = C_R (\underline{F}_{qSoll} - \underline{F}_q) = C_R \cdot \Delta \underline{F}_q,$$

das sich wegen der Proportionalität  $\underline{F} \sim \underline{x}_{qE}$  in der zeitdiskreten Form

$$\Delta \underline{x}_{qE} \mu+1 = (\Delta x_{qE1}, 0, \Delta x_{qE3})_{\mu+1}^T = C \cdot (\underline{F}_{qSoll} - \underline{F}_q)_\mu$$

darstellen läßt.

Nach Fig. 2 liefert ein Bahngenerator BG die Achssollwerte  $(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon)_{\mu+1}$  für den Zeitpunkt  $t_{\mu+1}$ , wobei die Position zu diesem Zeitpunkt mittels der Sensorinformation  $\underline{F}_{p\mu}$  zum vergangenen Zeitpunkt  $t_\mu$  korrigiert wird. Die Bahn soll weiterhin mit einer vorgegebenen Normalkraft  $F_{q1Soll}$  abgefahren werden.

Die zweidimensionale Sensorinformation  $\underline{F}_{p\mu}$  wird mit Hilfe einer Rechenschaltung R 1, die die Beziehung

$F_{q1\mu} = F_{p1\mu} \cdot \cos(\varphi_{\mu}) - F_{p2\mu} \cdot \sin(\varphi_{\mu})$  in die Normalkraft  $F_{q1\mu}$  im Koordinatensystem  $K_q$  transformiert.

Mit Hilfe der Subtraktionsschaltung S 1 wird die Differenz  $\Delta F_{q1\mu}$  zwischen dem von der Sollkraftquelle SQ gelieferten Signal

$F_{q1S|\mu}$  und der transformierten Normalkraft  $F_{q1\mu}$  gebildet. Der

Betragsbildner B liefert den Betrag  $|\Delta F_{q1\mu}|$  dieser Differenz,

der wiederum mit dem Betrag eines Solldifferenzsignals  $|\Delta F_{q1S|\mu}|$ ,

der von der Umschaltenschwellwertquelle UQ geliefert wird, über

einen Komparator K 1 verglichen wird. Für  $|\Delta F_{q1\mu}| > |\Delta F_{q1S|\mu}|$

wird ein zweiter Komparator K 2 mit Hilfe des Tores T 1 akti-

viert (siehe Fig. 3). Dieser vergleicht  $|\Delta F_{q1\mu}|$  mit dem Betrag

eines Havarieschwellwerts  $|\Delta F_{q,1 \max|\mu}|$ , der von der Havarieschwell-

wertquelle HQ geliefert wird. Ist  $|\Delta F_{q1\mu}| > |\Delta F_{q1 \max|\mu}|$ , so

wird über ein Havariesignal HAV des Komparators K 2 der In-

dustrieroboter IR zum Abheben des Werkzeuges W von der Ober-

fläche O in eine Havarieposition veranlaßt. Ist  $|\Delta F_{q1\mu}| \leq |\Delta F_{q1 \max|\mu}|$ ,

so wird ein Schalter AS mit Hilfe des Tores T 2 geschlossen,

der das Signal  $\Delta F_{q1}$  durchschaltet.  $\Delta F_{q1}$  wird dann mittels eines

Verstärkers V 1 verstärkt und stellt dann den Korrekturwert

$\Delta x_{qE1|\mu+1}$  in Richtung der Flächennormalen im Koordinaten-

system dar (Regelung der Spantiefe). Für den Fall, daß der

Komparator K 1  $|\Delta F_{q1\mu}| \leq |\Delta F_{q1S|\mu}|$  ermittelt hat, aktiviert

er das Tor T 3 der Rechenschaltung R 3. Diese ermittelt aus  $\underline{F}_{p\mu}$

die Tangentialkraft  $F_{q3\mu}$  mittels der Beziehung  $F_{q3\mu} =$

$F_{p1\mu} \cdot \sin(\varphi_{\mu}) + F_{p2\mu} \cdot \cos(\varphi_{\mu})$

Da eine Tangentialsollkraft  $F_{q3S\mu}$  nicht unabhängig von  $F_{q1S\mu}$  vorgegeben werden kann, wird dann mit Hilfe der Rechenschaltung

R 4 aus  $F_{q1\mu}$  und  $F_{q1S\mu}$  die Sollkraft  $F_{q3S\mu}$  durch

$$F_{q3S\mu} = F_{q1S\mu} \cdot \frac{F_{q3\mu}}{F_{q1\mu}}$$

gebildet.

Die Subtraktionsschaltung S 2 bildet die Differenz

$\Delta F_{q3\mu} = F_{q3S\mu} - F_{q3\mu}$ , die ihrerseits mittels eines Verstärkers V 2 verstärkt wird und dann den Korrekturwert  $\Delta x_{qE3|\mu+1}$  in Richtung der Flächentangente ein Koordinatensystem darstellt

(Regelung der Vorschubgeschwindigkeit  $v$ ). Aus dem Korrekturwert

$\Delta x_{qE1|\mu+1}$  bzw.  $\Delta x_{qE3|\mu+1}$  und den Informationen  $(\beta, \gamma, \delta, \epsilon)_{\mu}^T$  über die Achswinkel des Roboters zum Zeitpunkt  $t_{\mu}$  sowie den geforderten Anstellwinkel  $\varphi_{\mu}$  des Werkzeugs W zur Oberfläche O bildet die Rechenschaltung R 2 Korrekturen  $(\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)_{\mu+1}^T$  für die Position des Referenzpunktes R an der Oberflächenkontur

zum Zeitpunkt  $t_{\mu+1}$  über die Beziehung

$$(\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)_{\mu+1}^T = J^{-1}(Q.P)^{-1} \Delta x_{qE\mu+1}$$

wobei  $(Q.P)^{-1}$  die Transformationsmatrix vom Werkstückkoordinatensystem in das Grundkoordinatensystem und J die Jakobimatrix darstellt.

Diese Korrekturen werden zu der geplanten Solltrajektorie zum Zeitpunkt  $t_{\mu+1}$  addiert und der korrigierte Sollwertvektor

$(\alpha_S + \Delta \alpha, \beta_S + \Delta \beta, \gamma_S + \Delta \gamma, \delta_S, \epsilon_S)_{\mu+1}^T$  der Antriebsregelung des IR zugeführt.

Die Steuerung der einzelnen Phasenerfolgt durch ein Steuerwerk ST, daß den Anstellwinkel  $\varphi_{\mu}$ , die Trajektorie TRA und den Takt TAKT liefert.

### Erfindungsanspruch

1. Regelungsverfahren zur Abtastung und Bearbeitung von Konturen durch eine Maschine, einen Industrieroboter oder einen Manipulator, mit Hilfe eines Kraft-Momentensensors unter Berücksichtigung der Toleranzen des Abtastwerkzeugs und der zu bearbeitenden Oberflächenkontur und unter Voraussetzung einer grob vorgegebenen Bahnkurve dadurch gekennzeichnet, daß
  - a) die Bahnkurve des Bearbeitungswerkzeugs entlang der Oberflächenkontur grob vorgegeben wird,
  - b) die erforderliche Normalkomponente der Reaktionskraft im Koordinatensystem des Referenzpunktes an der Oberfläche vorgegeben wird,
  - c) die Sensorsignale des Kraft-Momentensensors erfaßt werden, wobei diese Signale, die im Koordinatensystem des Sensors wirkenden Kraftkomponenten darstellen,
  - d) die tatsächlich wirkende Normalkomponente der Reaktionskraft im Referenzsystem aus den Sensorsignalen ermittelt wird,
  - e) die Soll-Istwert-Differenz der Kräfte aus Verfahrensschritt b) und d) gebildet wird,
  - f) die Soll-Istwert-Differenz der Normalkräfte mit einem vorgegebenen Umschaltenschwellwert verglichen wird; wird dieser Schwellwert überschritten, so wird die Soll-Istwert-Differenz mit einer Havarieschwelle verglichen; wird die Havarieschwelle überschritten, so wird der Regelungsvorgang gestoppt;
  - g) bei Nichtüberschreitung der Havarieschwelle aus der Soll-Istwert-Differenz der Normalkräfte eine Wegkorrektur normal zur Oberfläche im Referenzsystem ermittelt wird, was einer Korrektur der Zustellbewegung entspricht,
  - h) bei Nichtüberschreitung des Umschaltenschwellwertes aus Schritt f) die tatsächlich wirkende Tangentialkomponente der Reaktionskraft im Referenzsystem aus den Sensorsignalen ermittelt wird,

- i) aus den tatsächlich wirkenden Kraftkomponenten aus Schritt d) und h) und der vorgegebenen Sollkraft aus Schritt b) die erforderliche Sollkomponente für die Tangentialkraft im Referenzpunkt ermittelt wird,
  - j) die Soll-Istwert-Differenz der Tangentialkräfte aus Schritt h) und i) gebildet wird,
  - k) aus der Soll-Istwert-Differenz der Tangentialkräfte aus Schritt j) eine Wegkorrektur tangential zur Oberfläche im Referenzsystem ermittelt wird, was einer Korrektur der Vorschubgeschwindigkeit entspricht,
- 1) die Wegkorrekturen im Referenzsystem aus Schritt g) bzw. k) in Weg- bzw. Winkelkorrekturen bez. des Koordinatensystems der Bearbeitungsmaschine umgewandelt werden.
2. Verfahren nach Punkt 1, dadurch gekennzeichnet, daß die auftretende Soll-Istkraft-Differenz dadurch ausgeregelt wird, daß jeweils eine solche Kraftänderungsgeschwindigkeit erzeugt wird, die der Soll-Istkraft-Differenz proportional ist.
3. Verfahren nach Punkt 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß
    - a) die geplante Bahnkurve als Folge von Stützpunkten und Zeitintervallen entlang der Oberflächenkontur vorgegeben wird,
    - b) innerhalb der vorgegebenen Stützpunkte durch lineare Interpolation Zwischenpunkte erzeugt werden, die innerhalb eines festen Zeitintervalls durchlaufen werden,
    - c) diese Zwischenpunkte durch die nach Punkt 1 angegebenen Verfahrensschritte korrigiert werden,
    - d) die im vorhergehenden Stützpunktintervall entstandene Korrektur der Zwischenpunkte in dem aktuell abzuarbeitenden Intervall berücksichtigt wird,
    - e) im Falle des Überschreitens der Havarieschwelle das Bearbeitungswerkzeug in eine über der Oberflächenkontur befindliche Parkposition gebracht wird.

4. Anordnung zur Durchführung des Verfahrens nach Punkt 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Ausgänge eines Kraft-Momentensensors (SE) an die Eingänge 1 und 2 einer ersten Rechenschaltung (R1) zur Transformation der Signale im Sensorkoordinatensystem in ein Signal, das der Normalkraft im Referenzsystem entspricht, geführt werden, wobei deren Ausgang zusammen mit dem Ausgang einer Sollkraftquelle (SQ) auf ein Subtraktionsglied (S1) geschaltet wird, dessen Ausgang mit dem Eingang eines Betragsbildners (B) verbunden ist, dessen Ausgang und der Ausgang einer Umschalt-schwellwertquelle (UQ) auf den positiven bzw. negativen Eingang eines ersten Komparators (K1) geschaltet sind, dessen nicht negierter Ausgang Q wiederum mit dem Toreingang T1 eines zweiten Komparators (K2) verbunden ist, dessen Plus- bzw. Minuseingang mit dem Ausgang des Betragsbildners (B) bzw. mit dem Ausgang einer Havarieschwellwertquelle (HQ) verbunden ist, daß der Ausgang Q des Komparators (K2) mit dem Eingang einer Havarieschaltung (HAV) der Bearbeitungs-maschine (IR) verbunden ist, daß der negierte Ausgang  $\bar{Q}$  des Komparators (K2) mit dem Tor T2 eines Analogschalters (AS) verbunden ist, dessen Eingang an den Ausgang des Sub-traktionsgliedes (S1) angeschlossen ist, wobei der Ausgang des Analogschalter (AS) auf den Eingang eines Verstärkers (V1) geführt ist, dessen Ausgang mit dem Eingang 1 einer zwei-ten Rechenschaltung (R2) zur Transformation der Signale, die räumlichen Korrekturwerten bezüglich der Oberflächenkontur entsprechen in Signale, die eine Bewegungsänderung der Bearbeitungsmaschine hervorrufen, verbunden ist, daß außer-dem die Ausgänge des Kraft-Momentensensors (SE) an die Eingänge 1 und 2 einer dritten Rechenschaltung (R3) zur Trans-formation der Signale im Sensorkoordinatensystem in ein Signal, das der Tangentialkraft im Referenzsystem entspricht, geführt sind, deren Torleitung T3 an dem negierten Ausgang Q des ersten Komparators (K1) angeschlossen ist, wobei der Ausgang der dritten Rechenschaltung (R3) mit dem Eingang 1 einer vierten Rechenschaltung (R4) zur Berechnung des Tangentialsollkraftsignals aus dem Normalsollkraftsignal und den in der ersten und zweiten Rechenschaltung (R1;R2)

ermittelten Signalen und mit dem Minuseingang des zweiten Subtraktionsgliedes (S2) verbunden ist, daß der Eingang 2 der vierten Rechenschaltung (R4) mit dem Ausgang der ersten Rechenschaltung (R1) und der Eingang 3 der vierten Rechenschaltung (R4) mit dem Ausgang der Sollkraftquelle (SQ) verbunden ist, daß der Ausgang der vierten Rechenschaltung (R4) an den Pluseingang des zweiten Subtraktionsgliedes (S2) angeschlossen ist, dessen Ausgang auf den Eingang eines Verstärkers (V2) führt, dessen Ausgang wiederum mit dem Eingang 2 der zweiten Rechenschaltung (R2) verbunden ist, daß die Ausgänge der zweiten Rechenschaltung (R2) zusammen mit Ausgängen einer Sollbahnquelle (BG) auf die Eingänge einer Summierschaltung (A) führen, wobei die Ausgänge der Summierschaltung an die Bahnkurveneingänge der Bearbeitungsmaschine (IR) angeschlossen sind, daß die Bahnkurvenausgänge der Bearbeitungsmaschine mit den Parametereingängen der zweiten Rechenschaltung (R2) verbunden sind, daß die Eingänge PHI der Rechenschaltungen (R1;R2;R3) mit dem Ausgang PHI für den Anstellwinkel eines Steuerwerkes (ST) an den Eingängen T von der dritten Rechenschaltung (R3), des Komparators (K2) und des Analogschalters (AS) angeschlossen ist und daß der Bahnkurvenausgang TRA des Steuerwerkes (ST) mit dem Eingang der Sollbahnquelle (BG) verbunden ist.

Hierzu 3 Blatt Zeichnungen

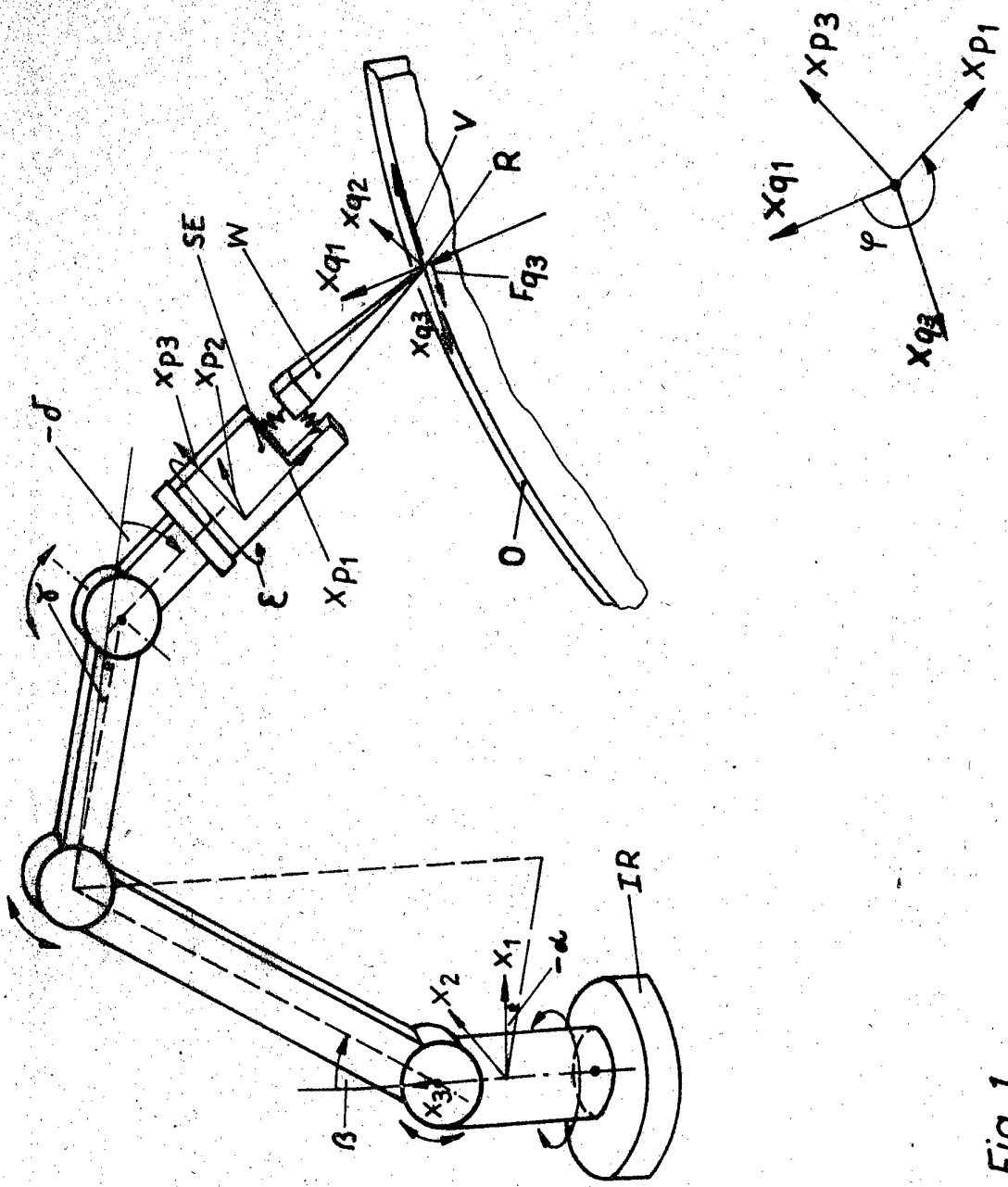


Fig. 1



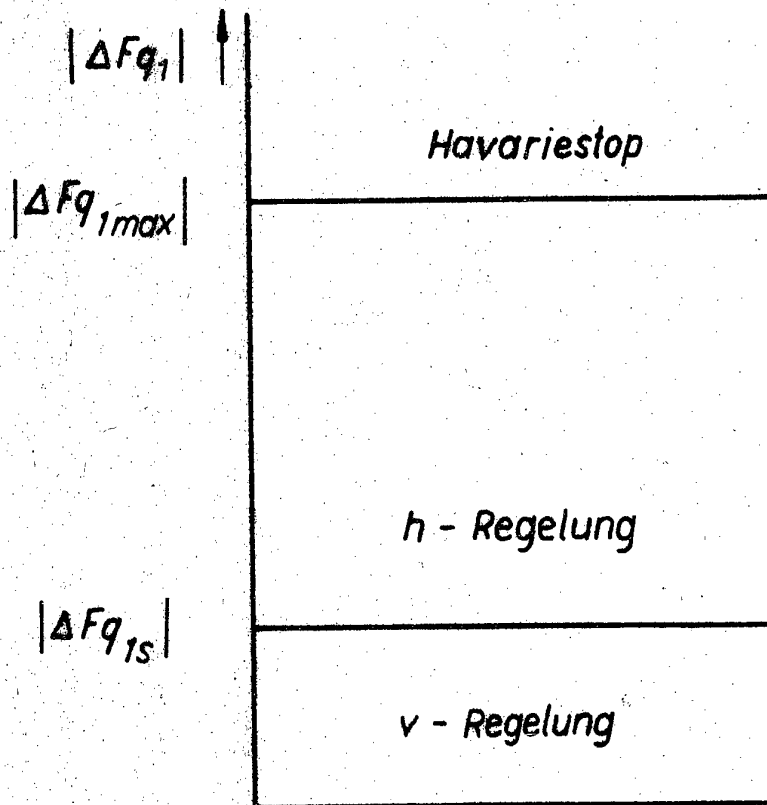


Fig. 3