



(12) Wirtschaftspatent

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1 Patentgesetz

(19) DD (11) 235 740 A1

4(51) G 05 B 19/18  
 B 25 J 9/18  
 B 23 Q 15/00  
 G 05 B 13/00

AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) WP G 05 B / 274 373 7

(22) 25.03.85

(44) 14.05.86

(71) Akademie der Wissenschaften der DDR, 1080 Berlin, Kurstraße 33, DD

(72) Palm, Rainer, Dr., DD

(54) Verfahren und Anordnung zur Konturabtastung mit Ausregelung der relativen Effektorposition- und -orientierung

(57) Die Erfindung hat die Regelung eines Bearbeitungs- oder Abtastvorganges von Konturen mit Hilfe eines Industrieroboters, eines Manipulators oder einer anderen Bearbeitungsmaschine, die mit Kraft-Momentensensoren ausgerüstet ist, zum Ziel. Dieses wird dadurch erreicht, daß in bekannter Weise mit Hilfe einer Suchbewegung taktiler Kontakt zu der abzutastenden Kontur aufgenommen wird, wobei die Kontur in einem vorgegebenen Umlaufsinn entsprechend einer erfindungsgemäßen Konturverfolgungsvorschrift kraftadaptiv bis zu einem vorgegebenen Abbruchkriterium abgetastet wird. Vorgeschrieben sei die Konturebene, in der der Abtastprozeß abläuft. Der Konturfolgerblock erzeugt aus einer Anzahl von Positionskorrekturen eine Regressionsgerade, deren Anstieg die nächste Tangentialrichtung bestimmt. Gleichzeitig wird die relative Effektorientierung in bezug auf die neu erzeugte Tangentialrichtung korrigiert. Die berechneten Positions- und Orientierungskonturen werden in das Basissystem des Roboters transformiert und in einen Bewegungsbefehl umgewandelt. Fig. 2

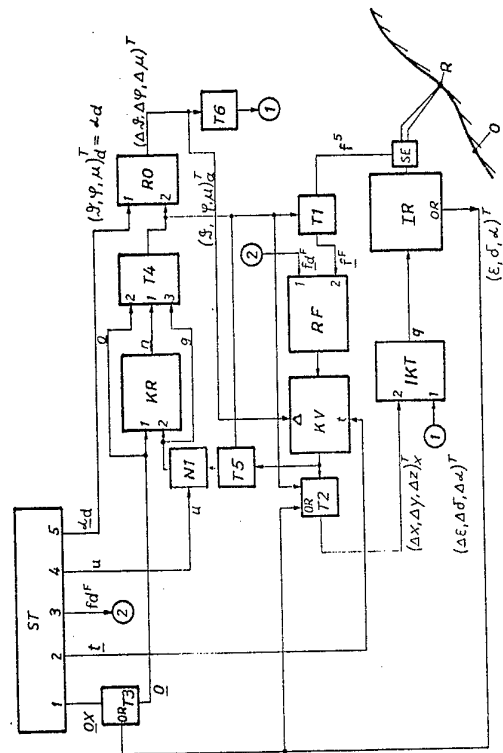


Fig. 2

**Erfindungsanspruch:**

1. Verfahren zur Konturabtastung und Ausregelung der relativen Effektorposition- und -orientierung durch eine Maschine oder einen Industrieroboter mit Hilfe eines Kraftsensors unter der Voraussetzung, daß der Effektor mittels einer Suchbewegung in der vermuteten Normalrichtung der zu bearbeitenden Kontur in taktilen Kontakt mit dieser getreten ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß
  - a) die Bewegungsrichtungen eines oder mehrerer Kurvenabschnitte entlang einer nur grob bekannten Kontur vorgegeben werden,
  - b) die Konturebenen jedes einzelnen Bahnkurvenabschnitts durch Festlegung eines Binormalvektors  $\underline{o}$  bestimmt werden,
  - c) wie an sich bekannt, eine erforderliche Normalkraft für den kraftadaptiven Abtast- bzw. Bearbeitungsvorgang festgelegt wird,
  - d) die erforderliche Relativorientierung zwischen Effektor und Kontur entlang jedes geplanten Bahnkurvenabschnitts festgelegt wird,
  - e) die Reaktionskräfte in bekannter Weise mit Hilfe eines Kraftsensors gemessen werden,
  - f) diese Reaktionskräfte bekanntermaßen entsprechend der aktuellen Relativorientierung in das Oberflächenkontursystem  $K_F$  transformiert werden,
  - g) in dem System  $K_F$  der Kraftfehler entlang der Oberflächennormalen bestimmt wird,
  - h) aus dem Kraftfehler und einem PID-Regler RF eine Positionskorrektur berechnet und diese in die Systeme  $K_s$  und  $K_x$  transformiert wird,
  - i) aus den vergangenen Positionskorrekturen entsprechend einer linearen Regression ausführenden Konturverfolgungsvorschrift die nächste Tangentialrichtung in  $K_F$  bestimmt wird,
  - j) der für den aktuellen Trajektorienabschnitt geplante Binormalvektor  $\underline{o}$  in das System  $K_s$  transformiert wird,
  - k) aus der in Schritt 1 berechneten Tangentialrichtung durch Normierung und Berücksichtigung des Umlaufsinnns der Tangentialvektor  $\underline{a}$  ermittelt wird,
  - l) durch Bildung des Kreuzproduktes  $\underline{n} = \underline{o} \times \underline{a}$  der Normalvektor  $\underline{n}$  ermittelt wird,
  - m) aus dem ermittelten Dreibein  $(\underline{n}, \underline{o}, \underline{a})$  die aktuellen Relativwinkel  $\vartheta, \varphi, \mu$  zwischen Werkzeug und Oberfläche ermittelt werden,
  - n) aus dem in Schritt m ermittelten und in Schritt d vorgegebenen Winkeln sowie einem PID-Regler RD eine Winkelkorrektur  $\Delta\vartheta, \Delta\varphi, \Delta\mu$  ermittelt wird,
  - o) die im Schritt n ermittelte Winkelkorrektur in das Basissystem  $K_s$  transformiert und zu der bereits vorhandenen Korrektursumme und zu den geplanten Winkeln addiert wird,
  - p) der Positions- und Winkelvektor mit seinen Korrekturen aus den Schritten i und o in einem Bewegungsbefehl für den Manipulator umgewandelt wird.
2. Verfahren nach Punkt 1 i, **dadurch gekennzeichnet**, daß
  - a) jeder Bewegungsschritt in n Teilschritte gegliedert wird,
  - b) eine Regressionsgerade durch die ausgeführten n Positionen gelegt wird,
  - c) aus dem Anstieg der Regressionsgeraden die Richtung des nächsten Tangentialvektors ermittelt wird.
3. Verfahren nach Punkt 1 und 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß innerhalb der n Teilschritte eines Bewegungsschrittes die Effektororientierung linear interpoliert wird
4. Anordnung zur Durchführung des Verfahrens nach Punkt 1, 2 und 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Ausgänge eines Kraftsensors (SE) auf den Eingang einer ersten Transformationsschaltung (T1) geführt werden, der Ausgang der ersten Transformationsschaltung (T1) auf den zweiten Eingang eines Kraftreglers (RF) geführt wird, dessen erster Eingang mit dem dritten Ausgang eines Steuerwerkes (ST) verbunden ist, wobei der Ausgang des Kraftreglers (RF) auf den Konturverfolgerblock (KV) geführt wird, dessen Ausgang an die Eingänge der zweiten und fünften Transformationsschaltung (T2; T5) geführt ist, wobei der Ausgang der zweiten Transformationsschaltung (T2) an den zweiten Ausgang der Schaltung zur inversen Koordinatentransformation (IKT) angeschlossen ist, daß weiterhin der erste Ausgang des Steuerwerkes (ST) mit einer dritten Transformationsschaltung (T3) verbunden ist, deren Ausgang an den ersten Eingang einer Rechenschaltung zur Kreuzproduktbildung (KR) und an den dritten Eingang einer vierten Transformationsschaltung (T4) geführt wird, daß der Ausgang der fünften Transformationsschaltung (T5) über eine Normierungsschaltung (N1) an den zweiten Eingang der Rechenschaltung zur Bildung des Kreuzproduktes (KR) sowie an den dritten Eingang der vierten Transformationsschaltung (T4) führt, daß außerdem der Ausgang der Rechenschaltung zur Kreuzproduktbildung (KR) an den ersten Eingang der vierten Transformationsschaltung (T4) führt, wobei der Ausgang dieser Schaltung mit dem zweiten Eingang des Orientierungsreglers (RO) verbunden ist, dessen erster Eingang mit dem Winkelsollwertausgang des Steuerwerkes (ST) verknüpft ist und dessen Ausgang einerseits mit dem  $\Delta$ -Eingang des Korrekturverfolgerblocks verbunden ist und andererseits über eine sechste Transformationsschaltung (T6) auf den ersten Eingang der Schaltung zur inversen Koordinatentransformation (IKT) geführt wird, daß der t-Eingang des Konturverfolgerblocks (KV) mit den Bahnrichtungsausgang des Steuerwerkes (ST) verknüpft ist und der q-Ausgang der Schaltung zur inversen Koordinatentransformation (IKT) auf die Antriebsregler des Roboters führt, daß weiterhin die Orientierungsausgänge des Roboters auf die zweite und dritte Transformationsschaltung (T2; T3) führen, während der Ausgang der vierten Transformationsschaltung (T4) mit der ersten, zweiten und fünften Transformationsschaltung (T1; T2; T5) verknüpft ist, daß schließlich der vierte Ausgang des Steuerwerkes (ST) zur Festlegung des Umlaufsinnns an die Normierungsschaltung (N1) geführt wird.

Hierzu 4 Seiten Zeichnungen

**Anwendungsgebiet der Erfindung**

Die Erfindung betrifft Prozesse des Fräsen und Gußputzens und Abtastprozesse von Konturen, insbesondere mit Hilfe von Industrierobotern und Manipulatoren, die mit Kraft-Momenten-Sensoren ausgerüstet sind.

## Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Die in der Patentliteratur angegebenen Verfahren zur Konturverfolgung lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- Verfahren, die eine berührungslose Abstandssensorik verwenden, insbesondere geeignet für Schweißprozesse
- Verfahren mit taktiler Sensorik, insbesondere Kraft-Momenten-Sensorik, geeignet für spanabhebende Bearbeitungsprozesse

Im Patent DE-OS 2825239 wird zum Schweißen einer Kehlnaht einem geplanten Geschwindigkeitsvektor ein Abdriftvektor überlagert, der durch die Abstandsmessung zwischen Werkzeug und zwei senkrecht aufeinanderstehenden Oberflächen mit Hilfe zweier Lichtstrahlsensoren gebildet wird. Etwaige Bahnkrümmungen werden durch eine spezielle mechanische Vorrichtung zur Orientierungsnachführung berücksichtigt. Dieses Verfahren ist mit der Vorrichtung zur Orientierungsnachführung eng gekoppelt und stellt daher nachteiligerweise hinsichtlich des letzten Punktes keine allgemeine Lösung dar.

Verfahren zur relativen Lageerfassung an einem Manipulatorgreifer werden in den Patentschriften DE-OS 3210066 und DE-OS 2330782 behandelt.

Die DE-OS 3244307 behandelt ein Verfahren zur Konturverfolgung von Stumpfnähten, bei dem einer vorgegebenen Bahn ebenfalls ein Abdriftvektor überlagert wird.

Die beschriebenen Verfahren haben den Nachteil, daß sie auf die Messung und die Ausregelung der Orientierung relativ zur Kontur verzichten.

Wie in der DE-OS 2824266 beschriebenen kraftadaptiven Fräsverfahren stützt sich der Fräserschaft direkt auf der Kontur ab, wobei aus den gemessenen Kräften Lageänderungen bzgl. der geplanten Bahnkurve ermittelt werden. Auch hier besteht der Nachteil, daß zwar eine Lage- aber keine Orientierungsregelung des Werkzeugs erfolgt.

Die DE-OS 3240250 beschreibt ein Belehrungsverfahren mit Kraft-Momenten-Sensor, das als Basis für Konturverfolgungsvorgänge wie Schleif- und Entgratarbeiten dienen kann. Der Roboter kann sich in der Wiederholphase adaptionalen Änderungen der Kontur entsprechend einer Höhenregelung anpassen.

Wie Gurfinkel, V. S.; ...: An Adaptive Manipulator with force Sensors, Mechanism and Machine Theory Vol. 18 No. 4 pp 267-270 1983, Great Britain, wird das Abtasten von Konturen mit Hilfe eines Kraft-Momenten-Sensors beschrieben. Die erwünschte Lageänderung relativ zur Oberflächennormalen wird aus der Normal- und der Reibungskraft ermittelt, wobei der Reibungskoeffizient experimentell bestimmt wird.

Wie Manafusa, H.; ...: Contouring Control of an Articulated Robot Arm with Manipulation Variable Feedback Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Robots (Tokyo, Japan) Reprints S. 429-436, beschreibt ein Konturverfolgungsverfahren mit einer komplexen Effektorsensorik, bei der sowohl Position und Orientierung als auch die Relativgeschwindigkeit zwischen Effektor und Kontur gemessen werden. Die geplante Bahn besteht ausschließlich aus der Vorgabe des Geschwindigkeitsvektors längs der Kontur und der Sollorientierung. Der Nachteil bei diesem Verfahren liegt in der Festlegung einer Normal-Soll-Orientierung, wobei die freie Wahl einer Soll-Orientierung als ausgeschlossen angenommen werden kann.

Wie H. van Brussel, ...: An Intelligent Force Controlled Robot Annals of the CIRP Vol. 31/1/1982, wird ein Konturverfolgungsalgorithmus beschrieben, bei dem jeder folgende Bewegungsschritt aus einem Positionskommando und einem Korrekturkommando gebildet wird, wobei das letztere Kommando sich aus der Messung der Normalkraft zwischen Effektor und Kontur ergibt. Dieses Verfahren führt zwar Lage und Orientierung nach, erschwert dagegen bei ungünstigen Anfangsbedingungen das Einschwingen in die Kontur.

## Ziel der Erfindung

Die Erfindung hat das Ziel, die bekannten technischen Lösungen insofern zu verbessern, daß für einen kraftadaptiven Abtastvorgang entlang einer Kontur die Korrekturrichtung des Abtastwerkzeugs durch Bestimmung der Relativorientierung zwischen Werkzeug und Kontur mittels Kraftinformationen übermittelt wird und daß bei Vorgabe einer Sollkraft und einer Sollorientierung der Effektor entlang der Kontur geführt wird, wobei eine Ausregelung der Relativorientierung erfolgt.

## Darlegung des Wesens der Erfindung

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, durch Messung von Reaktionskräften mit Hilfe eines Kraftsensors eine nur grob bekannte Kontur zu bearbeiten oder abzutasten und die Relativorientierung zwischen Effektor und Kontur auszuregeln, wobei der Bearbeitungs- oder Abtastvorgang mit Hilfe einer Maschine, insbesondere mittels eines Industrieroboters oder Manipulators erfolgt. Hierbei wird der Effektor entlang der Kontur eines fest eingespannten Werkstücks geführt.

Es wird vorausgesetzt, daß der Kraftsensor in definierter Weise starr mit dem Effektor und dem Führungsmechanismus wie z. B. einem Manipulatorarm verbunden ist. Weiterhin gilt die Voraussetzung, daß es eine geplante Bewegungsrichtung entlang der Konturanzbehafeten und damit nicht vollständig bekannten Kontur gibt und daß außerdem die Korrektorebene abschnittsweise bekannt ist.

Mit „Relativorientierung“ zwischen Effektor und Oberfläche ist der dreidimensionale Verdrehungsvektor  $\alpha = (\vartheta, \varphi, \mu)^T$  zwischen dem Koordinatensystem  $K_T$  des Werkzeugs und einem Oberflächensystem  $K_F$  im Referenzpunkt R gemeint, wobei die Winkel  $\vartheta$ ,  $\varphi$ , und  $\mu$  diejenigen Verdrehungswinkel des Systems  $K_T$  um dessen ursprüngliche  $x_T$ ,  $y_T$  und  $z_T$ -Achse sind, um die man  $K_T$  verdrehen muß, damit die Koordinatenachsen von  $K_T$  und  $K_F$  zur Deckung gelangen. Die Verdrehung beider Systeme läßt sich auch durch die Projektion der Einheitsvektoren  $\underline{n}_F$ ,  $\underline{o}_F$  und  $\underline{a}_F$  des Systems  $K_F$  auf die Achsen  $x_T$ ,  $y_T$  und  $z_T$  des Systems wie folgt beschreiben:

$$\begin{array}{r}
 n_x \ o_x \ a_x \\
 n_y \ o_y \ a_y \\
 n_z \ o_z \ a_z
 \end{array}
 =
 \begin{array}{ccc}
 c(\mu)c(\varphi) & c(\mu)s(\varphi)s(\vartheta) - s(\mu)c(\vartheta) & c(\mu)s(\varphi) + s(\mu)s(\vartheta) \\
 & & (\vartheta) \\
 s(\mu)c(\varphi) & s(\mu)s(\varphi)s(\vartheta) + c(\mu)c(\vartheta) & s(\mu)s(\varphi)c(\vartheta) - c(\mu)s(\vartheta) \\
 -s(\varphi) & s(\vartheta)c(\varphi) & c(\vartheta)c(\varphi)
 \end{array}$$

Der Einfachheit sollen ohne Einschränkung der Allgemeinheit das Sensorkoordinatensystem  $K_S$  und das Effektorkoordinatensystem  $K_T$  nicht gegeneinander verdreht sein, so daß die Verdrehungen zwischen  $K_F$  und  $K_T$  sofort in  $K_S$  gemessen werden können.

Der Bearbeitungs- bzw. Abtastvorgang beginnt damit, daß im kontaktlosen Fall eine geplante Suchbewegung in Richtung der Kontur ausgeführt wird. Beim Überschreiten einer bestimmten Kontaktkraft wird eine Suchbewegung beendet und der Abtastvorgang eingeleitet.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß

1. die Bewegungsrichtungen eines oder mehrerer Kurvenabschnitte entlang nur einer grob bekannten Kontur vorgegeben werden,
2. die Korrekturebenen jedes einzelnen Bahnkurvenabschnitts durch Festlegung eines Binormalvektors  $\underline{o}$  bestimmt werden,
3. wie an sich bekannt, eine erforderliche Normalkraft für den kraftadaptiven Abtast- bzw. Bearbeitungsvorgang festgelegt wird,
4. die erforderliche Relativorientierung zwischen Effektor und Kontur entlang jedes geplanten Bahnkurvenabschnitts festgelegt wird,
5. die Reaktionskräfte in bekannter Weise mit Hilfe eines Kraftsensors gemessen werden,
6. diese Reaktionskräfte bekanntermaßen entsprechend der aktuellen Relativorientierung in das Oberflächenkontursystem  $K_F$  transformiert werden,
7. in dem System  $K_F$  der Kraftfehler entlang der Oberflächennormalen bestimmt wird,
8. aus dem Kraftfehler und einem PID-Regler  $r_F$  entsprechend einer Konturverfolgungsvorschrift mittels linearer Regression die nächste Positionskorrektur in  $K_F$  berechnet und in die Systeme  $K_S$  und  $K_x$  transformiert wird,
9. der für den aktuellen Trajektorienabschnitt geplante Binormalvektor  $\underline{o}$  in das System  $K_S$  transformiert wird,
10. aus dem in Schritt 8 berechneten Bahnvektor durch Normierung und Berücksichtigung des Umlaufsinn der Tangentialvektor  $\underline{a}$  ermittelt wird,
11. durch Bildung des Kreuzproduktes  $\underline{n} = \underline{o} \times \underline{a}$  der Normalvektor  $\underline{n}$  ermittelt wird,
12. aus dem ermittelten Dreibein  $(\underline{n}, \underline{o}, \underline{a})$  die aktuellen Relativwinkel  $\vartheta, \varphi$  und  $\mu$  ermittelt werden,
13. aus den in Schritt 12 ermittelten und in Schritt 4 vorgegebenen Winkeln sowie einem PID-Regler  $r_o$  eine Winkelkorrektur  $\Delta\vartheta, \Delta\varphi, \Delta\mu$  ermittelt wird,
14. die in Schritt 13 ermittelte Winkelkorrektur in das Basissystem  $K_S$  transformiert, zu der bereits vorhandenen Korrektursumme und zu den geplanten Winkeln addiert wird,
15. der Positions- und Winkelvektor mit seinen Korrekturen aus den Schritten 8 und 14 in einen Bewegungsbefehl für den Manipulator umgewandelt wird.

Der erste Schritt erfolgt also in Richtung der geplanten Bahn mit Berücksichtigung der Korrektur, die aus einem Soll-Ist Kraftvergleich folgt. Der resultierende Bahnvektor wird normiert und stellt zunächst den Tangentialvektor  $\underline{\hat{a}}$  des Koordinatensystems  $K_F$  dar. Da der Binormalvektor  $\underline{o}$  für den aktuellen Trajektorienabschnitt, also die Korrekturebene, als bekannt vorausgesetzt wird, ist der Tangentialvektor  $\underline{a}$  entsprechend dem jeweils gewählten Umlaufsinn, in dem die Kontur durchlaufen wird, nach dem normierten Bahnvektor wie folgt festzulegen: Bei positivem Umlaufsinn ist der Tangentialvektor  $\underline{a}$  gleich dem negativen normierten Bahnvektor. Bei negativem Umlaufsinn ist der Tangentialvektor  $\underline{a}$  gleich dem positiven normierten Bahnvektor.

Der Normalvektor  $\underline{n}$  ergibt sich dann aus dem Kreuzprodukt  $\underline{n} = \underline{o} \times \underline{a}$ . Die Projektionen von  $\underline{n}, \underline{o}$  und  $\underline{a}$  in  $K_S$  werden mit dem o. g. Schema verglichen und die entsprechenden Verdrehungswinkel  $\vartheta, \varphi$  und  $\mu$  ermittelt. An diesen Winkeln, den erforderlichen Sollwinkeln  $\vartheta_d, \varphi_d$  und  $\mu_d$  und aus den resultierenden Fehlern  $e_\vartheta, e_\varphi$  und  $e_\mu$  werden mit Hilfe einer Regelvorschrift  $r_o(e_\vartheta, e_\varphi, e_\mu)$  die erforderlichen Winkelkorrekturen  $\Delta\vartheta, \Delta\varphi, \Delta\mu$  berechnet.

Die Positionsänderung  $\Delta x^F, \Delta y^F, \Delta z^F$  erfolgt mit Hilfe des Kraftfehlervektors  $\underline{e}_f = \underline{f}_d - \underline{f}$ , einem Regelgesetz  $r_f(\underline{e}_f)$  und einer Konturverfolgungsvorschrift, die die vergangenen Korrekturen in die Rechnung mit einbezieht. Winkelkorrektur und Positionsänderung werden in das Basissystem  $K_x$  des Manipulators transformiert und in einen Bewegungsbefehl umgewandelt. Das eigentliche Verfahren zur Konturverfolgung (siehe Schritt 8) beschränkt sich auf die durch den Binormalvektor  $\underline{o}$  definierte Ebene. Der erste Bewegungsschritt geht vom Kontaktfall aus und setzt die Vorgabe einer Anfangsposition voraus.

Dieser Bewegungsschritt wird in  $n$  gleiche Teilschritte entlang der ursprünglich angenommenen Oberflächentangente gegliedert. Diese Teilschritte werden entsprechend dem gewählten Kraftregelgesetz so abgearbeitet, daß der Effektor kraftadaptiv der Kontur folgt. Während dieser Periode wird eine Regressionsgerade durch die  $n$  vergangenen Positionen gelegt und damit die neue Tangentialrichtung berechnet.

Die Ermittlung eines Folgeschrittes entsprechend der Konturverfolgungsaufgabe wird im allgemeinen dadurch gelöst, daß

1. durch die  $n$  vergangenen Positionen eine Regressionsgerade gelegt wird,
2. die Richtung des neuen Tangentialvektors durch den Anstieg der Regressionsgeraden bestimmt wird,
3. der neue Tangentialvektor auf eine vom Ablaufprogramm vorgegebene Länge  $L$  normiert wird, wobei die nächsten  $n$  Teilschritte entlang dieses Tangentialvektors mit einer kraftadaptiven Normalkorrektur ausgeführt werden können.

Der Abbruch der Konturverfolgung erfolgt durch ein geeignetes Kriterium wie

- Überschreiten einer vorgegebenen Anzahl von Zyklen
- Überschreiten einer bestimmten Kraftschwelle
- Ansprechen eines binären Sensors

Die Schaltungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens wird dadurch realisiert, daß die Ausgänge eines Kraftsensensors auf den Eingang einer ersten Transformationsschaltung TS geführt werden. Der Ausgang der ersten Transformationsschaltung TS wird auf den zweiten Eingang eines Kraftreglers geführt, dessen erster Eingang mit dem dritten Ausgang eines Steuerwerkes verbunden ist. Der Ausgang des Kraftreglers führt auf den Konturverfolgungsblock, von dessen Ausgang führen Verbindungen in die Eingänge der zweiten und fünften Transformationsschaltung TS und von dem Ausgang der zweiten Transformationsschaltung TS auf den zweiten Eingang der Schaltung zur inversen Koordinatentransformation.

Der erste Ausgang des Steuerwerkes führt an eine dritte Transformationsschaltung TS, deren Ausgang an den ersten Eingang einer Rechenschaltung zur Kreuzproduktbildung und an den dritten Eingang einer vierten Transformationsschaltung führt. Der Ausgang der fünften Transformationsschaltung führt über eine Normierungsschaltung an den zweiten Eingang der Rechenschaltung zur Bildung des Kreuzproduktes sowie an den dritten Eingang der vierten Transformationsschaltung TS. Der Ausgang der Rechenschaltung zur Kreuzproduktbildung führt an den ersten Eingang der vierten Transformationsschaltung.

Der Ausgang dieser Schaltung ist mit dem zweiten Eingang des Orientierungsreglers verbunden, dessen erster Eingang mit dem Winkelsollwertausgang des Steuerwerkes verknüpft ist und dessen Ausgang einerseits mit dem  $\Delta$ -Eingang des Konturverfolgerblocks verbunden ist und andererseits über eine sechste Transformationsschaltung auf den ersten Eingang der Schaltung zur inversen Koordinatentransformation geführt wird.

Der t-Eingang des Konturverfolgerblocks ist mit dem Bahnrichtungsausgang des Steuerwerkes verknüpft.

Der q-Ausgang der Schaltung zur inversen Koordinatentransformation führt an die Antriebsregler des Roboters.

Die Orientierungsausgänge des Roboters führen auf die zweite und dritte Transformationsschaltung TS, während der Ausgang der vierten Transformationsschaltung mit der ersten, zweiten und fünften Transformationsschaltung TS verknüpft ist.

Der Ausgang des Steuerwerkes zur Festlegung des Umlaufsinnnes führt an die Normierungsschaltung.

Der funktionelle Inhalt der Rechen- und Transformationsschaltungen ist folgender:

Steuerwerke:	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Vorgabe der Kraft- und Orientierungssollwerte,</li> <li>— abschnittsweise Vorgabe des Binormalenvektors <math>\underline{o}</math></li> <li>— Vorgabe von Zielpunkten, Bahnrichtungen und dem Umlaufsinn</li> </ul>
Konturverfolgerblock:	— Ermittlung der nächsten Tangentialrichtung aus den Positionskorrekturwerten und der vergangenen Bahnrichtung durch lineare Regression
Kraftregler:	— Ermittlung einer Positionskorrektur in Abhängigkeit von Kraftfehlern durch ein PID-Regelgesetz
Orientierungsregler:	— Ermittlung einer Orientierungskorrektur in Abhängigkeit von Winkelfehlern durch ein PID-Regelgesetz
Kreuzproduktschaltung:	Bildung des Kreuzproduktes zwischen Binormalvektor und Tangentialvektor und Ausgabe des Normalvektors
Vormierungsschaltung:	Ermittlung des neuen Tangentialvektors aus der im Konturverfolgerblock ermittelten Tangentialrichtung
Erste Transformationsschaltung:	aus dem Sensorsystem $K_s$ in das Oberflächensystem $K_F$
Zweite Transformationsschaltung:	Transformation der im $K_F$ ermittelten Positionsänderung in das Basissystem $K_s$ mittels der aktuellen Relativorientierung und der Roboterstellung
Kreuzproduktschaltung:	Bildung des Kreuzproduktes zwischen Binormalvektor und Tangentialvektor und Ausgabe des Normalvektors
Vormierungsschaltung:	Ermittlung des neuen Tangentialvektors aus der im Konturverfolgerblock ermittelten Tangentialrichtung
Erste Transformationsschaltung:	Transformation der gemessenen Transformationskraft aus dem Sensorsystem $K_s$ in das Oberflächensystem $K_F$
Zweite Transformationsschaltung:	Transformation der im $K_F$ ermittelten Positionsänderung in das Basissystem $K_s$ mittels der aktuellen Relativorientierung und der Roboterstellung
Dritte Transformationsschaltung:	Transformation des vorgegebenen Binormalvektors $\underline{o}^x$ aus dem Basissystem $K_s$ in das Sensorsystem $K_s$
Vierte Transformationsschaltung:	Ermittlung der Orientierungswinkel $(\vartheta, \varphi, \mu) a^T$ aus den in $K_s$ gebildeten Vektoren $\underline{n}, \underline{o}, \underline{a}$
Fünfte Transformationsschaltung:	Transformation der in $K_F$ ermittelten Positionsänderung in das Sensorsystem $K_s$ mittels der aktuellen Relativorientierung
Sechste Transformations-schaltung:	Transformation der Winkelkorrektur $(\Delta\vartheta, \Delta\varphi, \Delta\mu)^T$ aus dem Sensorsystem $K_s$ in das Basissystem $K_x$ mit der Winkelkorrektur $(\Delta\varepsilon, \Delta\delta, \Delta\alpha)^T$
Schaltung zur inversen Koordinatentransformation:	Transformation der kartesischen Koordinaten in die Manipulatorkoordinaten

### Ausführungsbeispiel

Die Erfindung wird nachstehend in einem Ausführungsbeispiel näher erläutert. Die entsprechenden grafischen Darstellungen zeigen in

Fig. 1: einen Industrieroboter mit einer zu bearbeitenden Oberflächenkontur

Fig. 2: das Prinzipblockschaltbild des erfindungsgemäßen Verfahrens mit Schaltungsanordnung

Fig. 3: die prinzipielle Arbeitsweise des Konturverfolgerblockes

Fig. 4: Definition des Binormalvektors  $\underline{o}$  und des Umlaufsinnns  $u$

Das Ausführungsbeispiel bezieht sich auf einen Industrieroboter IR nach Fig. 1, an dessen Handgelenke ein Effektor E, in diesem Fall hydraulisch betriebene Schleifmaschine, mit einem dreikomponentigen Kraftsensor montiert ist.

Es besteht die Aufgabe, mit dem Effektor E eine nur grob bekannte Kontur 0 mit einer vorgeschriebenen Tangentialgeschwindigkeit  $v$  und entsprechend einer vorgegebenen Andruckkraft  $f_d^F$  sowie relativen Werkzeugorientierung  $\alpha_d$  mit Hilfe des Kraftsensors SE kraftadaptiv zu bearbeiten. Mit „vorgegebener Andruckkraft“ wird die Reaktionskraft  $f_d^F$  bezüglich eines an der Oberfläche 0 im Referenzpunkt R (Berührungspunkt) errichteten kartesischen Koordinatensystems KF bezeichnet. Dieses Koordinatensystem ist durch das Festlegen eines Binormalvektors  $\underline{o}$  und der Ermittlung des gerade aktuellen Tangentialvektors  $\underline{a}$  gegeben.

Mit der Festlegung des Binormalvektors  $\underline{o}$  beispielsweise durch eine Belehrungsphase ist ein Wahl der Korrektorebene gemeint, die vom Nutzer eines Industrieroboters IR getroffen werden muß. Eine aktuelle Orientierung zwischen Sensorsystem  $K_s$  und Oberflächensystem  $K_F$  durch den Verdrehungswinkelvektor  $(\vartheta, \varphi, \mu)_a^T$  vorausgesetzt, wird der im Sensorkoordinatensystem  $K_s$  gemessene Kraftvektor  $f^F$  mittels der Transformationsschaltung T1 in das Oberflächensystem  $K_F$  transformiert (siehe Fig. 2). Die Normalkomponente des sich ergebenden Kraftvektors  $f^F$  wird mit der vorgegebenen Normalkraft  $f_d^F = (f_d^F, 0, 0)_a^T$  einem Kraftregler RF zugeführt, der eine erforderliche Positionskorrektur in Richtung der gewählten Oberflächennormale ausgibt. Die Positionskorrektur gelangt an den Konturverfolgerblock KV, der gemeinsam mit einem vom Steuerwerk ST vorgegebenen Bahnrichtungsvektor  $\underline{t}$  die nächste anzusteuende Position im  $K_F$  ermittelt. Diese Positionsänderung wird mit Hilfe von T2 in das Basissystem  $K_x$  transformiert und der inversen Koordinatentransformation IKT als Positionsänderungsvektor zur Verfügung gestellt. Bei der Transformation in der zweiten Transformationsschaltung T2 werden sowohl die Verdrehungswinkel  $(\varepsilon, \delta, \alpha)^T$  des Sensorsystems  $K_s$  gegenüber  $K_x$  als auch die Verdrehungswinkel  $(\vartheta, \varphi, \mu)^T$  zwischen  $K_s$  und  $K_F$  berücksichtigt. Die durch den Konturverfolgerblock KV zu ermittelnde nächste Tangentialrichtung ergibt sich wie folgt (siehe Fig. 3):

Vorgegeben sei die ursprüngliche Bewegungsrichtung des Effektors E entlang der Kontur 0.

Der erste Bewegungsschritt, dessen Richtung vorgegeben ist, wird in  $n$  Teilschritte zergliedert. Entsprechend dieser Vorgabe liegt das Koordinatensystem  $K_F$  und somit die Verdrehung des Sensorsystems  $K_s$  gegenüber  $K_F$  und daher auch die relative Effektororientierung mit den Verdrehungswinkeln  $(\vartheta, \varphi, \mu)^T$  fest. In der Startposition wird entsprechend der Kraftdifferenz

$$\Delta f_d^F = S \cdot (f_d^F - \underline{f}^F)$$

mit

$$\underline{f}^F = (f_d^F, 0, 0)^T$$

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

und einem PID-Reglergesetz in  $K_F$  eine Positionskorrektur  $\Delta x_s$  in Richtung der angenommenen Oberflächennormale bestimmt und der erste Teilschritt mit der berechneten Korrektur ausgeführt. Diese Teilschritte werden  $n$ -fach wiederholt. Aus den letzten  $n$  Positionen wird durch die Regressionsvorschrift

$$a = A \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot i - B \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$A = \sum_{i=1}^n i = \frac{1}{2} \cdot n(n+1)$$

$$B = \sum_{i=1}^n i^2 = \frac{1}{6} \cdot n(n+1)(2n+1)$$

der Anstieg des nächsten Tangentialvektors berechnet.

Entlang dieses Vektors werden wiederum  $n$  Teilschritte ausgeführt. Um die Orientierung nachführen zu können, wird der ermittelte Tangentialvektor  $\underline{a}$  mit T5 und einer Normierungsschaltung N1 in das Sensorsystem transformiert. Weiterhin wird der im Basissystem festgelegte Binormalvektor  $\underline{o}_x$  durch T3 und der aktuellen Orientierung  $(\varepsilon, \delta, \alpha)^T$  des Handsystems  $K_H$  in das System  $K_s$  transformiert.

Aus den ermittelten Vektoren  $\underline{o}$  und  $\underline{a}$  wird über eine Kreuzproduktschaltung KR der Normalvektor  $\underline{n}$  gebildet, so daß mit Hilfe der Schaltung T4 die aktuellen Verdrehungswinkel  $(\vartheta, \varphi, \mu)_a^T$  bestimmt werden können. Aus diesen und den durch das Steuerwerk ST vorgegebenen Sollwinkeln  $\alpha_d = (\vartheta, \varphi, \mu)_d^T$  ergeben sich durch einen PID-Orientierungsregler RO die erforderlichen Winkelkorrekturen  $(\Delta\vartheta, \Delta\varphi, \Delta\mu)^T$ . Diese werden mit Hilfe von Transformationsschaltung 6 aus dem System  $K_s$  in das Basissystem  $K_x$  transformiert und der inversen Koordinatentransformation IKT zugeführt. Diese ermittelt ihrerseits entsprechend der geforderten Positions- und Orientierungsänderung die erforderlichen Gelenkpositionen des Roboters, die wiederum in einen Bewegungsbefehl umgewandelt werden. Um ein ruhiges Nachführen der Orientierung zu ermöglichen, beinhaltet der Konturverfolgerblock KV einen Interpolationsteil, der zwischen den berechneten Stützpunkten entsprechend einer freigewählten Schrittzahl  $n$  in der Orientierung linear interpoliert.

Die Festlegung des Umlaufsinn einer Konturverfolgungsbewegung wird durch die Definition des Binormalvektors ermöglicht (s. Fig. 4). Dieser steht senkrecht auf der Korrektorebene und befindet sich stets im jeweiligen Referenzpunkt der zu umfahrenden Kontur. Dann gilt folgende Regelung:

Positiver Umlaufsinn ( $u = +1$ ): Tangentialvektor  $\underline{a}$  zeigt entgegen der Tangentialgeschwindigkeit  $\underline{v}$ .

Negativer Umlaufsinn ( $u = -1$ ): Tangentialvektor  $\underline{a}$  zeigt in Richtung der Tangentialgeschwindigkeit  $\underline{v}$ .

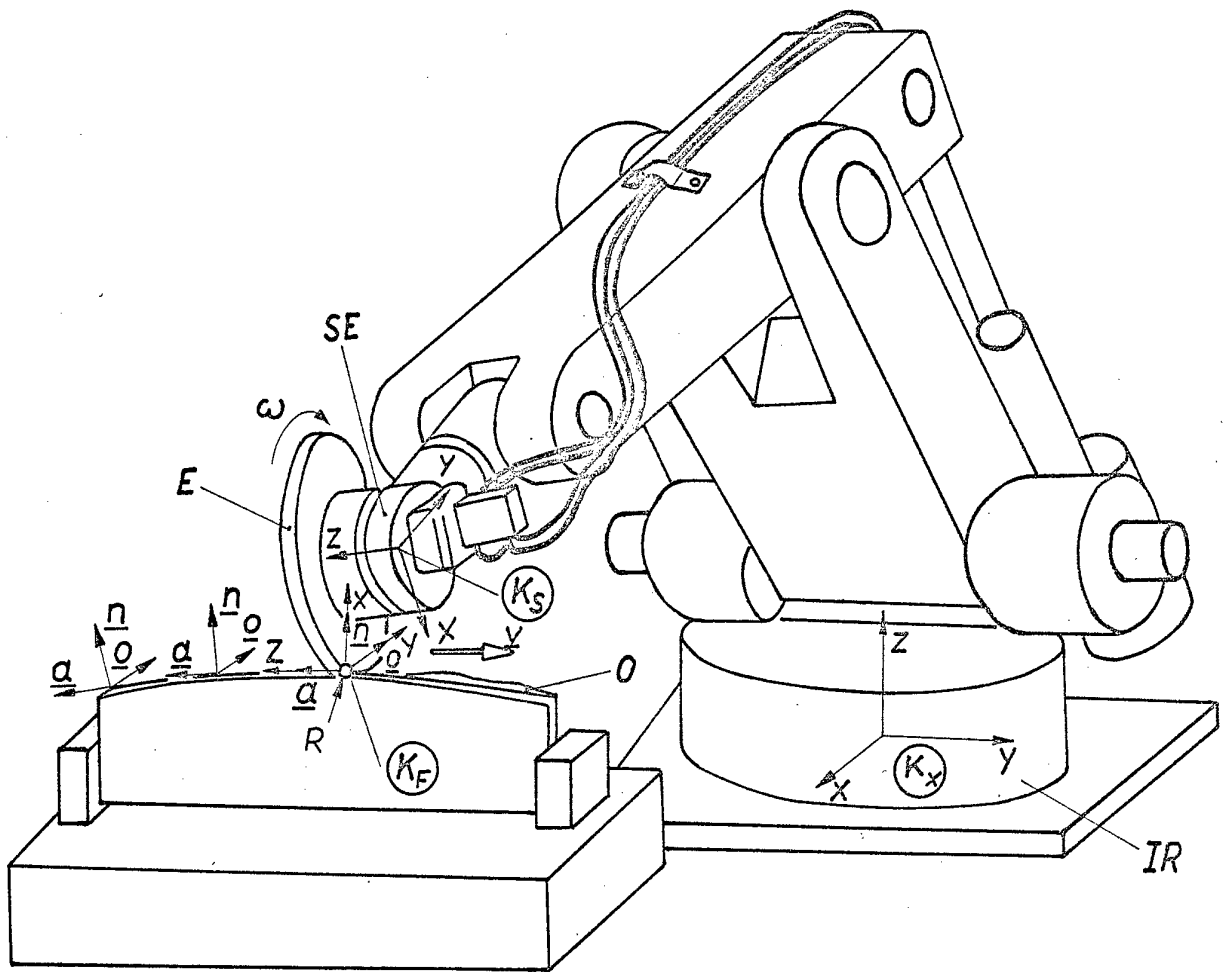


Fig. 1



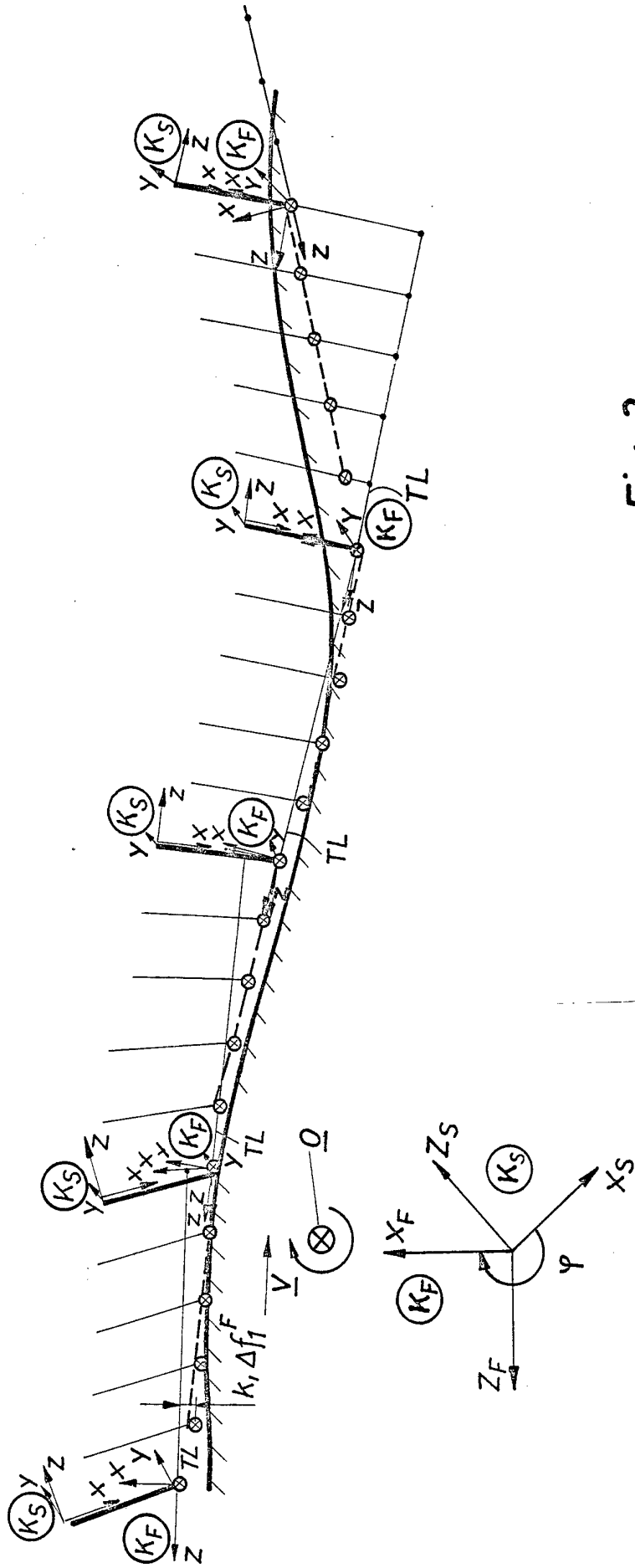
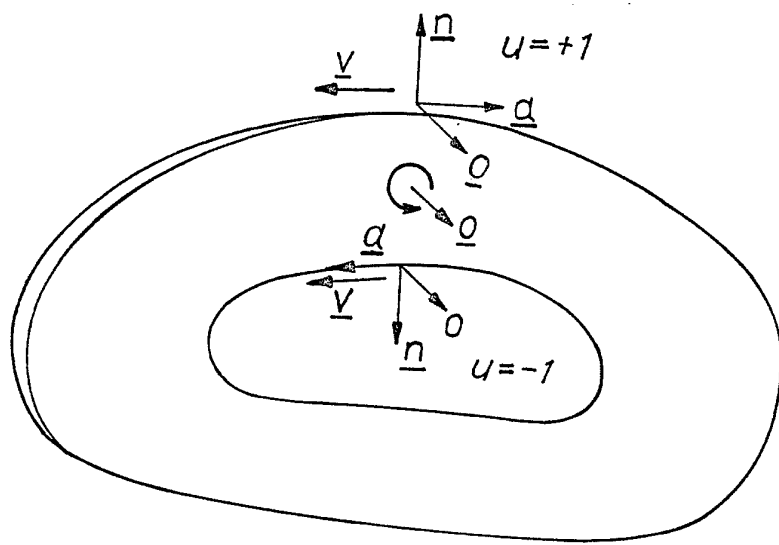


Fig. 3



*Fig. 4*