



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 004 466.7**
(22) Anmeldetag: **08.04.2016**
(43) Offenlegungstag: **12.10.2017**

(51) Int Cl.: **B25J 9/18 (2006.01)**
B25J 9/10 (2006.01)
B25J 9/14 (2006.01)

(71) Anmelder:
Hydac Electronic GmbH, 66128 Saarbrücken, DE

(74) Vertreter:
**Bartels und Partner Patentanwälte, 70174
Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:
**Kohl, Peter, 66440 Blieskastel, DE; Pfeiffer, Felix,
14482 Potsdam, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

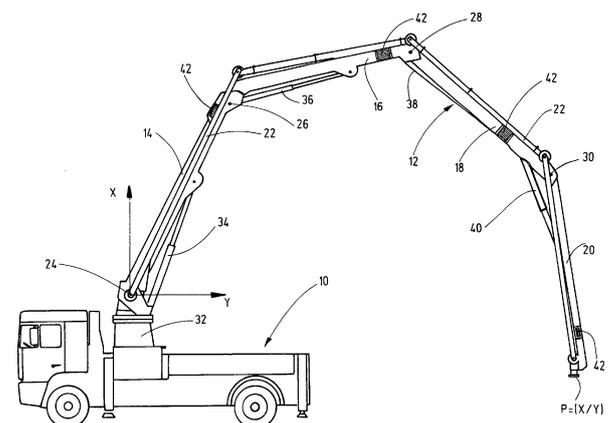
US	2015 / 0 266 185	A1
WO	2014/ 165 888	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bewegen des letzten Gliedes einer kinematischen Kette sowie Vorrichtung und Arbeitsmaschine zum Durchführen des Verfahrens**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bewegen des letzten Gliedes (20) einer kinematischen Kette (12) oder eines Endeffektors (P) zu einer vorgegebenen Position (X, Y), wobei die Kette aus mindestens drei Gliedern (14, 16, 18, 20) besteht, die jeweils über Gelenkstellen (26, 28, 30) schwenkbar miteinander verbunden sind und die über mindestens einen Aktuator (34, 36, 38, 40) bewegt werden, wobei mittels Sensoren (42) die Neigung sowie die Drehrate zumindest eines Teils der jeweiligen Glieder als Sensormesswerte erfasst werden, und wobei eine Auswertelektronik die Sensormesswerte in eine Bewegungsabfolge für den jeweiligen Aktuator derart umsetzt, dass eine stetige Bewegung innerhalb der kinematischen Kette (12) erfolgt, bis das letzte Glied (20) oder der Endeffektor (P) die vorgegebene Position (X, Y) erreicht hat.



Beschreibung

[0001] Durch die WO 2014/165888 A1 ist ein elektrohydraulischer Steuerkreis zum Ansteuern eines hydraulisch betätigbaren Stellorgans bekannt, mittels dessen ein Glied einer kinematischen Kette eines Manipulators, insbesondere in Form eines Großmanipulators für Autobetonpumpen, hinsichtlich seiner Orientierung einstellbar ist. Dabei ist ein elektrisch angesteuertes erstes Ventil, welches mit hydraulischen Arbeitsleitungen des Stellorgans zu dessen Ansteuerung verbunden ist, sowie in den Arbeitsleitungen des Stellorgans vorgesehene Sperrventile vorhanden, die an dem Stellorgan oder dem diesem Stellorgan zugeordneten Glied angeordnet und für den Normalbetrieb des Stellorgans entsperrenbar sind, wobei das Entsperren der Sperrventile durch eine von dem ersten Ventil und den Sperrventilen gesonderte elektronische Auswertelektronik (ECU) angesteuert wird.

[0002] Zum Stand der Technik verweist diese Lösung auf derzeit eingesetzte elektrohydraulische Steuerkreise und damit in Zusammenhang stehende Regelsysteme, wie diese beispielsweise zum Ansteuern von mehrgliedrigen Großmanipulatoren für Autobetonpumpen verwendet werden, die im Allgemeinen über einen zentralen Steuerblock verfügen, mit dem einzelne Segmente oder Glieder einzeln angesteuert werden können. Hierzu sind den Segmenten hydraulische Stellorgane oder Aktuatoren zugeordnet, welche wahlweise elektrohydraulisch mittels Pilotventilen oder manuell über Handhebel bedient werden können. Die hydraulischen Stellorgane sind in der Regel als Hydraulikzylinder ausgeführt, wobei die Auslenkung eines im Zylinder aufgenommenen Kolbens mit der Auslenkung eines zugeordneten Segmentes oder Gliedes der kinematischen Kette korreliert. Zur Dämpfung von elastischen Schwingungen werden in den derzeit eingesetzten Systemen Algorithmen eingesetzt, gemäß welchen die Druckdifferenz des Kammerdruckes des jeweiligen Hydraulikzylinders auf das dem Zylinder zugehörige Steuerventil rückgeführt wird.

[0003] Bei den bekannten Lösungen werden für die Bewegungssteuerung des letzten Gliedes einer solchen kinematischen Kette und mithin des Endpunkts, der fachsprachlich auch mit Endeffektor bezeichnet wird, bei vier Armsegmenten oder Gliedern insgesamt fünf Achsen mit einbezogen, wobei für das Verschwenken der kinematischen Kette mit den einzelnen Gliedern oder Armsegmenten um eine Hochachse ein Drehgelenk verwendet wird, und zwischen den Gliedern oder Armsegmenten sind vier Gelenkstellen vorhanden, wobei für die Schwenkbewegung jedes Gliedes oder Armsegmentes um die jeweilige Gelenkstelle jeweils ein Aktuator in Form eines Hydraulikzylinders zum Einsatz kommt. Jede angesprochene Bewegungsachse wird dabei regelmäßig durch ein 4/3-Wegeventil angesteuert, wobei hier auch andere Ventilkonstruktionen zum Einsatz kommen können. Der Bediener der Arbeitsmaschine hat dabei zwei Joysticks zum Steuern der gesamten kinematischen Kette zur Verfügung, wobei die Joysticks mehrfach belegt sind, und die Auswahl der jeweils angesteuerten Glieder oder Armsegmente der kinematischen Kette erfolgt über Wahlschalter am Bedienelement. Da dergestalt nicht alle Glieder respektive Armsegmente der kinematischen Kette gleichzeitig bewegt werden können, ist eine harmonische Bewegung des Gesamtarbeitsarmes, sprich also der kinematischen Kette als Ganzes nicht möglich, und insgesamt sind schon sehr erfahrene Bediener notwendig, um auch einfachste Bewegungen bezogen auf das letzte Glied der Kette in Form des Endeffektors realisieren zu können.

[0004] Ausgehend von diesem Stand der Technik ist es Aufgabe der Erfindung, eine vereinfachte Bedienung für den Bediener zu realisieren, damit dieser das letzte Glied einer kinematischen Kette respektive den Endeffektor ruck- und hemmnisfrei an eine vorgegebene Position (x, y) unmittelbar verfahren kann.

[0005] Eine dahingehende Aufgabe löst ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruches 1 in seiner Gesamtheit. Das erfindungsgemäße Verfahren dient dem Bewegen des letzten Gliedes respektive des Endeffektors einer kinematischen Kette zu einer vorgegebenen Position (X, Y), wobei die kinematische Kette aus mindestens drei Gliedern besteht, die jeweils über Gelenkstellen schwenkbar miteinander verbunden sind und die über mindestens einen Aktuator zueinander bewegt werden können. Das erfindungsgemäße Verfahren setzt Sensoren ein, die die Neigung sowie die Drehrate des jeweiligen Gliedes als Sensormesswerte erfassen können, wobei eine Auswertelektronik die Sensormesswerte in eine Bewegungsabfolge für den jeweiligen Aktuator derart umsetzt, dass eine stetige, harmonische Bewegung vorzugsweise aller Glieder der kinematischen Kette erfolgt, indem alle Aktuatoren entsprechend sinnfällig angesteuert werden und zwar so lange, bis das letzte Glied oder der Endeffektor die vorgegebene Position (X, Y) erreicht hat. Der Endeffektor selbst bewegt sich dabei stetig differenzierbar, was vorzugsweise auch für die Glieder der kinematischen Kette gilt.

[0006] Die vorstehend beschriebene Aufgabe wird auch durch eine Vorrichtung gemäß der Merkmalsausgestaltung des Patentanspruches 8 gelöst sowie mit einer vorzugsweise mobil gehaltenen Arbeitsmaschine gemäß der Merkmalsausgestaltung des Patentanspruches 10.

[0007] Der Begriff „Endeffektor“ ist der Robotik entlehnt und wird dort laut Wikipedia-Eintrag als das letzte Element einer kinematischen Kette bezeichnet. Bei Industrie-Robotern kann es sich hierbei z. B. um eine Einheit zum Schweißen von Autokarosserien oder allgemein um einen einfachen Greifer handeln. Der im Englischen als „TCP (tool center point)“ bezeichnete ausgezeichnete Punkt am Ende der kinematischen Kette ist das Zielsystem, für das die aus der gestellten Aufgabe resultierenden Positionieranforderungen gelten. Aufgabenspezifisch kann der TCP dabei auch außerhalb der eigentlichen kinematischen Kette liegen; Beispiele wären der Fokus eines gegriffenen Lasers oder auch die Mitte des gerade transportierten Objekts.

[0008] Sofern nach der vorliegenden Erfindung von dem sogenannten letzten Glied der kinematischen Kette die Rede ist, schließt dies auch die folgenden Bedeutungen mit ein. Das letzte Glied kann ein Armsegment eines mehrgliedrigen betätigbaren Arbeitsarmes sein; es kann aber auch ausschließlich als das freie Ende des dahingehend letzten Endgliedes in der kinematischen Kette betrachtet werden. Das dahingehend freie Ende kann dann unmittelbar den Endeffektor darstellen; es besteht aber auch die Möglichkeit, dass das letzte Glied das freie Ende eines flexiblen Abgabeschlauches oder einer Abgabeöffnung für Fluidmedium, wie Beton, darstellt, so dass insoweit das freie Ende des Abgabeschlauchs respektive die Abgabeöffnung den vorstehend beschriebenen Endeffektor darstellen.

[0009] Dabei ist insgesamt die Steuerung und die Regelung für den genannten Endeffektor oder das letzte Glied der kinematischen Kette, die den Arbeitsarm einer mobilen Arbeitsmaschine bildet, u. a. dadurch charakterisiert, dass man jedem Glied oder Arbeitsarmsegment einen Sensor zuordnet, der direkt oder indirekt zur Bestimmung des Winkels geeignet ist, der sich einstellt, wenn zwei einander benachbarte Glieder oder Armsegmente sich um die zwischen ihnen liegende Gelenkstelle unter der Einwirkung eines zugeordneten Aktuators bewegen. Die Ansteuerung der Aktuatoren mittels einer Steuer- oder Auswerteelektronik erfolgt dabei derart, dass sich Einstell-Winkel ergeben, die im Rahmen einer sogenannten inversen Kinematik es erlauben, dass das letzte Glied der kinematischen Kette oder der Endeffektor frei im kartesischen Koordinatensystem bewegt werden kann. Eine Vorgabe über die Steuerung für eine Änderung der Position des Endeffektors oder des letzten Gliedes erfolgt in mindestens einem dahingehenden kartesischen Koordinatensystem. Dergestalt lässt sich mit nur einem Joystick und einer Steuereingabe an ihm durch die Bedienperson zielgerichtet und auf direktem Weg der Endeffektor respektive das letzte Glied in der kinematischen Kette an die gewünschte, vorgegebene Position bringen.

[0010] Die Steuerung ist vorzugsweise derart ausgeführt, dass ein interner Regelkreis vorhanden ist und dass der zeitliche Verlauf der von den Armsegmenten oder Gliedern eingeschlossenen Winkel stetig differenzierbar ist. Alternativ kann beim Verfahren des letzten Gliedes oder des Endeffektors die Winkelgeschwindigkeit auch stetig sein. Die Geschwindigkeitsvorgaben, X und Y-Richtung für den Endeffektor, kann bevorzugt über den Joystick einer Arbeitsmaschine oder Arbeitsvorrichtung erfolgen oder die Vorgaben für die Position X und Y werden über eine andere Eingabemethode vorgegeben, beispielsweise, indem man den Endeffektor oder das letzte Glied von Hand in vorgegebene Positionen verbringt, was auch von außen über Steuereingaben an einem Eingabependel oder dergleichen erfolgen kann.

[0011] Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Lösung ergeben sich aus den Unteransprüchen. Im Folgenden wird die erfindungsgemäße Lösung anhand eines Ausführungsbeispiels nach der Zeichnung näher erläutert.

[0012] Dabei zeigen in prinzipieller und nicht maßstäblicher Darstellung die

[0013] Fig. 1 in Prinzipdarstellung eine Autobetonpumpe;

[0014] Fig. 2 in abstrakter Darstellung eine Kinematik mit vier schwenkbaren Gliedern $I_1, I_2 \dots I_{n-1}, I_n$, entsprechend den schwenkbaren Armsegmenten oder Gliedern der Autobetonpumpe nach der Fig. 1;

[0015] Fig. 3 und Fig. 4 in Form einer Regeldarstellung eine Geschwindigkeitsregelung bzw. eine Positionsregelung mit Geschwindigkeitsregelung für das letzte Glied respektive den Endeffektor einer kinematischen Kette, insbesondere gebildet aus Gliedern oder Armsegmenten eines Arbeitsarmes für eine Autobetonpumpe nach der Fig. 1.

[0016] Die Fig. 1 zeigt in prinzipieller Darstellung eine Betonpumpeneinrichtung, die als Autobetonpumpe ausgebildet ist, mit einer mobilen Arbeitsmaschine, wie einem Lastkraftwagen **10**. Der Lastkraftwagen **10** trägt einen Arbeitsarm **12**, der mit seinen einzelnen Armsegmenten oder Gliedern **14, 16, 18, 20** bei abstrakter Betrachtungsweise eine Art kinematische Kette ausbildet. Entlang des Arbeitsarmes **12** ist ein durchgehender

Schlauch **22** geführt, der in Blickrichtung auf die **Fig. 1** gesehen an seinem unteren freien Ende der Abgabe von Beton dient, das den Endeffektor P bildet. Die Zufuhr des Betons für den Lastkraftwagen **10** erfolgt in üblicher und daher nicht mehr näher beschriebener Art und Weise. Die einzelnen Glieder **14**, **16**, **18**, **20** der kinematischen Kette in Form des Arbeitsarmes **12** sind schwenkbar entlang einzelner Gelenkstellen **24**, **26**, **28** und **30** endseitig gelagert.

[0017] In die **Fig. 1** ist in Analogie zur prinzipiellen Gliederdarstellung einer kinematischen Kette nach der **Fig. 2** ein kartesisches Koordinatensystem X, Y eingezeichnet. Der Arbeitsarm **12** lässt sich über eine nicht näher dargestellte Mastdreheinrichtung **32** um die vertikal verlaufende Hochachse X in Blickrichtung auf die **Fig. 1** gesehen aus der Bildebene heraus und hinein verschwenken. Ferner ist für jedes Armsegment oder Glied zu dessen Verschwenken um eine zuordenbare Gelenkstelle ein Aktuator **34**, **36**, **38** und **40** vorgesehen in Form hydraulischer Arbeitszylinder respektive Hydraulikzylinder, die der einfacheren Darstellung wegen in der **Fig. 1** nicht vollständig abgebildet sind. Jeder Aktuator ist sowohl kolben- als auch stangenseitig schwenkbar mit dem jeweiligen Armsegment verbunden, wobei die Kolbenseite des ersten Aktuators **34** schwenkbar mit der Mastdreheinrichtung **32** verbunden ist. Des Weiteren weist jedes Armsegment oder Glied an geeigneter Position Sensoren **42** auf, die in der Art einer Blackbox-Darstellung für die einzelnen Armsegmente oder Glieder schematisch wiedergegeben sind.

[0018] Jeder Sensor **42**, der auch an einer anderen Stelle am jeweiligen Armsegment platziert sein könnte, ermöglicht bei aktueller Messwerterfassung die Feststellung der Neigung sowie der Drehrate eines jeweiligen Gliedes oder Armsegmentes **14**, **16**, **18**, **20**. Als besonders geeignet für die dahingehende Messwerterfassung erweisen sich sogenannte Neigungsgeber, die die Schutzrechtsinhaberin unter den Bestellnummern HIT 1000 und HIT 1500 anbietet. Die angesprochenen Neigungsgeber dienen der präzisen, schnellen und langzeitstabilen Erfassung der aktuellen Neigungen respektive Neigungswinkel der angesprochenen Armsegmente oder Glieder in zwei Achsen X, Y. Die eingesetzten Neigungsgeber als Sensoren **42** basieren dabei auf einem Multisensorsystem, das die Messwerte von sechs Freiheitsgraden erfasst. Anschließend werden die erfassten Messdaten digitalisiert und über ein sogenanntes CANopen-Protokoll einem CAN-Feldbussystem hochdynamisch aufbereitet zur Weiterverarbeitung durch eine nicht näher dargestellte Auswerteelektronik zur Verfügung gestellt. Die Neigungs-Messwerterfassung des jeweiligen Sensors **42** erfolgt dabei über eine Beschleunigungswerterfassung in drei Achsen bezogen auf das Erdschwerefeld, und die Drehraten oder Winkelgeschwindigkeiten für die einzelnen Glieder werden über ein sogenanntes Gyroskop in drei Achsen erfasst.

[0019] Die vorstehenden Ausführungen lassen sich als allgemeine Systemanforderungen zur Lösung der erfindungsgemäßen Aufgabe wie folgt zusammenfassen:

- Arbeitsarm als kinematische Kette ausgebildet mit mehr als drei Armsegmenten oder Gliedern;
- Jedes Armsegment oder Glied besitzt einen eigenen Aktuator in Form eines Hydraulikzylinders;
- Jedes Armsegment oder Glied besitzt einen eigenen Neigungs- und Drehratensensor;
- Jeder Neigungssensor gibt den absoluten Winkel bezogen zum Horizont oder der Y-Achse über CAN-Bus aus;
- Jeder Drehratensensor gibt die Winkelgeschwindigkeit über CAN-Bus aus; und
- Ein zentrales Steuergerät respektive die Auswerteelektronik übernimmt eine Sollwertgenerierung über eine inverse Kinematik sowie die Regelung oder Ansteuerung der einzelnen Aktuatoren.

[0020] Zur Erläuterung der vorstehend genannten Begriffe inverse Kinematik und Sollwertgenerierung soll nunmehr auf die abstrakte Darstellung einer kinematischen Kette nach der **Fig. 2** zurückgegriffen werden. Dabei entspricht das Glied I_1 dem Armsegment **14**, das Glied **12** dem Segment **16**, das Glied I_{n-1} dem Armsegment **18** und das Glied I_n mit dem Endeffektor P dem letzten Armsegment **20** nach der **Fig. 1**. Zwischen den Gliedern I_1 , I_2 , I_{n-1} und I_n verlaufen die Gelenkstellen **26**, **28** und **30**, und das erste Glied I_1 ist an seinem unteren Ende über die Gelenkstelle **24** innerhalb des kartesischen Koordinatensystems X, Y schwenkbar an der Mastdreheinrichtung **32** angelenkt. Die Schnittstellenwiedergabe zwischen dem Glied I_2 und I_{n-1} über drei Punkte macht deutlich, dass hier modellgemäß weitere Glieder oder Armsegmente im Rahmen der Bildung der kinematischen Kette mit hinzutreten können.

[0021] Unter Bezugnahme auf die Modelldarstellung nach der **Fig. 2** für die kinematische Kette respektive den Arbeitsarm **12** lässt sich nun die Position des Endeffektors P oder des letzten Gliedes **20** in X und Y-Richtung innerhalb des in **Fig. 2** gezeigten kartesischen Systems wie folgt berechnen:

$$X = l_1 \sin(\phi_1) + l_2 \sin(\phi_1 + \phi_2) + \dots + l_n \sin(\phi_1 + \dots + \phi_n) = \sum_{i=1}^n \left(l_i \sin \left(\sum_{j=1}^i \phi_j \right) \right) \quad (1)$$

$$Y = l_1 \cos(\phi_1) + l_2 \cos(\phi_1 + \phi_2) + \dots + l_n \cos(\phi_1 + \dots + \phi_n) = \sum_{i=1}^n \left(l_i \cos \left(\sum_{j=1}^i \phi_j \right) \right)$$

[0022] Ziel der Ansteuerung in einer Art Automatikmodus ist es nun, durch Vorgabe der Werte X und Y die Winkel $\phi_1 \dots \phi_n$ derart zu erhalten, dass die kinematische Kette mit ihren einzelnen Gliedern respektive der Arbeitsarm **12** eine stetige Bewegung ausführt. Eine analytische Lösung ist hier nicht möglich, da nur zwei Gleichungen zur Verfügung stehen, um n Unbekannte zu bestimmen. Um diesem Problem zu begegnen, denkt man sich jedes Gelenk durch Federn der Steifigkeit $s_1 \dots s_n$ in den Positionen $\phi_{1,0} \dots \phi_{n,0}$ gehalten. Dies ist nur ein möglicher Lösungsansatz; eine Alternative könnte auch darin bestehen, den Weg zwischen P_1 und P_2 zu minimieren, was im Folgenden jedoch nicht näher ausgeführt wird. Die Bewegung von P gestalten wir dann durch die Kräfte F_x und F_y , die im Punkt P am letzten Glied **20** der kinematischen Kette angreifen sollen. Unter Vernachlässigung von Reibung und Gewicht der Glieder oder Armsegmente ergeben sich dann die Bewegungsgleichungen:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\phi}_1 &= (\phi_{1,0} - \phi_1) s_1 + (F_x \cos(\phi_1) - F_y \sin(\phi_1)) l_1 \\ J_2 \ddot{\phi}_2 &= (\phi_{2,0} - \phi_2) s_2 + (F_x \cos(\phi_1 + \phi_2) - F_y \sin(\phi_1 + \phi_2)) l_2 \\ &\vdots \\ J_n \ddot{\phi}_n &= (\phi_{n,0} - \phi_n) s_n + \left(F_x \cos \left(\sum_{j=1}^n \phi_j \right) - F_y \sin \left(\sum_{j=1}^n \phi_j \right) \right) l_n \end{aligned} \quad (2)$$

[0023] Da wir nur stationäre Zustände betrachten wollen, gilt:

$$\begin{aligned} 0 &= (\phi_{1,0} - \phi_1) s_1 + (F_x \cos(\phi_1) - F_y \sin(\phi_1)) l_1 \\ 0 &= (\phi_{2,0} - \phi_2) s_2 + (F_x \cos(\phi_1 + \phi_2) - F_y \sin(\phi_1 + \phi_2)) l_2 \\ &\vdots \\ 0 &= (\phi_{n,0} - \phi_n) s_n + \left(F_x \cos \left(\sum_{j=1}^n \phi_j \right) - F_y \sin \left(\sum_{j=1}^n \phi_j \right) \right) l_n \end{aligned} \quad (3)$$

[0024] Zusammen mit den Gleichungen aus (1) erhält man so ein Gleichungssystem mit $n + 2$ Gleichungen und den $n + 2$ Unbekannten $\phi_1 \dots \phi_n$, F_x und F_y . Zur Reduktion des System auf Ordnung n löst man die beiden letzten Gleichungen aus (3) nach F_x und F_y auf, wozu man sie in die Form bringt:

$$0 = a_1 + F_x a_2 - F_y a_3 \quad 0 = b_1 + F_x b_2 - F_y b_3 \quad (4)$$

mit

$$\begin{aligned} a_1 &= (\phi_{n-1,0} - \phi_{n-1}) s_{n-1}, \quad a_2 = \cos \left(\sum_{j=1}^{n-1} \phi_j \right) l_{n-1}, \quad a_3 = \sin \left(\sum_{j=1}^{n-1} \phi_j \right) l_{n-1} \\ b_1 &= (\phi_{n,0} - \phi_n) s_n, \quad b_2 = \cos \left(\sum_{j=1}^n \phi_j \right) l_n, \quad b_3 = \sin \left(\sum_{j=1}^n \phi_j \right) l_n \end{aligned} \quad (5)$$

[0025] Die Kräfte ergeben sich dann zu

$$F_x = \frac{b_1 a_3 - b_3 a_1}{a_2 b_3 - b_2 a_3} \quad (6)$$

$$F_y = \frac{b_1 a_2 - b_2 a_1}{a_2 b_3 - b_2 a_3}$$

[0026] Die Divisionen sind jederzeit durchzuführen, denn Resubstituieren und Anwenden der Additionstheoreme

$$[\sin(x \pm y) = \sin x \cos y \pm \sin y \cos x]$$

ergibt dann für den Nenner

$$a_2 b_3 - b_2 a_3 = \cos\left(\sum_{j=1}^{n-1} \phi_j\right) l_{n-1} \sin\left(\sum_{j=1}^n \phi_j\right) l_n - \cos\left(\sum_{j=1}^n \phi_j\right) l_n \sin\left(\sum_{j=1}^{n-1} \phi_j\right) l_{n-1} =$$

$$l_{n-1} l_n \left(\cos\left(\sum_{j=1}^{n-1} \phi_j\right) \sin\left(\sum_{j=1}^n \phi_j\right) - \cos\left(\sum_{j=1}^n \phi_j\right) \sin\left(\sum_{j=1}^{n-1} \phi_j\right) \right) =$$

$$l_{n-1} l_n \sin(\phi_n) \quad (7)$$

[0027] Da durch die Winkelbegrenzung des Arbeitsarmes **12** mit dem Betonschlauch $\phi_n \neq 0$ gilt, ist der Nenner von 0 verschieden, woraus sich folgendes Gleichungssystem ergibt:

$$0 = f(x) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \left(l_i \sin\left(\sum_{j=1}^i \phi_j\right) \right) - X \\ \sum_{i=1}^n \left(l_i \cos\left(\sum_{j=1}^i \phi_j\right) \right) - Y \\ (\phi_{1,0} - \phi_1) s_1 + (F_x \cos(\phi_1) - F_y \sin(\phi_1)) l_1 \\ \vdots \\ (\phi_{n-2,0} - \phi_{n-2}) s_{n-2} + \left(F_x \cos\left(\sum_{j=1}^{n-2} \phi_j\right) - F_y \sin\left(\sum_{j=1}^{n-2} \phi_j\right) \right) l_{n-2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

mit F_x und F_y aus (6) und $x = [\phi_1 \dots \phi_n]^T$. Dieses Gleichungssystem ist wiederum analytisch nicht lösbar, weshalb bei der Lösung ein Newton-Verfahren oder ein sonstiges adäquates Verfahren anzuwenden ist.

[0028] Dazu ersetzt man die Funktion $f(x + \Delta)$ in der Gleichung durch eine Taylor-Reihenentwicklung erster Ordnung

$$0 = f(x_{k+1}) = f(x_k) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_k} \underbrace{(x_{k+1} - x_k)}_{=\Delta} \quad (9)$$

und erhält die Iterationsvorschrift

$$\Delta = - \underbrace{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_k} \right)}_{=J}^{-1} f(x_k) \quad (10)$$

$$x_{k+1} = x_k + \Delta$$

mit der Jacobi-Matrix J von f. Statt der Berechnung der Inversen der Jacobi-Matrix wird das Gleichungssystem

$$J\Delta = -f \quad (11)$$

mit Hilfe einer Gauß-Elimination oder einem anderen sonstigen adäquaten Verfahren nach Δ gelöst.

[0029] Zur Vorsteuerung der Winkelgeschwindigkeit in den einzelnen Elementen kann durch Ableitung von

$$0 = f(x) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \left(l_i \sin \left(\sum_{j=1}^i \phi_j \right) \right) \\ \sum_{i=1}^n \left(l_i \cos \left(\sum_{j=1}^i \phi_j \right) \right) \\ (\phi_{1,0} - \phi_1) s_1 + (F_x \cos(\phi_1) - F_y \sin(\phi_1)) l_1 \\ \vdots \\ (\phi_{1-2,0} - \phi_{n-2}) s_{n-2} + \left(F_x \cos \left(\sum_{j=1}^{n-2} \phi_j \right) \right) l_{n-2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

nach der Zeit berechnet werden

$$0 = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} = J\dot{x} - \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0030] Durch Lösen des linearen Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = J\dot{x} \quad (13)$$

nach \dot{x} können aus den zeitlichen Änderungen der Positionen \dot{X} und \dot{Y} die Winkeländerungen

$$\dot{x} = [\dot{\phi}_1 \dots \dot{\phi}_n]^T$$

berechnet werden.

[0031] Von dem Endeffektor P oder dem letzten Glied **20** der kinematischen Kette **12** ausgehend, ist es also anhand der damit einhergehenden inversen Kinematik und durch die mit der Regelung hinterlegten Steuerung möglich, eine gleichzeitige Ausführung von Bewegungen aller Glieder oder Armsegmente durchzuführen und dergestalt einen zeitlich stetig differenzierbaren Verlauf der Winkel zu erhalten, den die Armsegmente oder die Glieder jeweils miteinander einschließen. Dergestalt kann eine stetige Bewegung des Arbeitsarmes **12** im Raum entlang von kartesischen Koordinaten (X, Y-Ebene) mit der gezielten Ansteuerung nur eines Joy-Sticks gewährleistet werden. Dies hat so keine Entsprechung im Stand der Technik.

[0032] Unter Einsatz der vorstehend vorgestellten inversen Kinematik ist es nun möglich, beispielsweise gemäß der Darstellung nach der **Fig. 3** eine Geschwindigkeitsregelung für den Endeffektor P zu realisieren. Als Eingangswerte für den Regler, beispielsweise in Form eines Proportionalreglers dienen die aus der inversen Kinematik erhaltene Soll-drehrate [rad/s] sowie die mittels den Sensoren **42** aktuell gemessenen Winkelgeschwindigkeiten oder Drehraten [rad/s] für die einzelnen Armsegmente oder Glieder. Dabei ist vorgesehen, dass jedes Armsegment oder Glied **14, 16, 18, 20** einen eigenen Regler besitzt, welcher anhand von Soll- und Ist-Größe das jeweils zuzuordnende Hydraulikventil für einen Aktuator so stellt, dass sich der Soll-Winkel sowie die Soll-Winkelgeschwindigkeit am jeweiligen Armsegment oder Glied einstellen.

[0033] Bei der Regelungsausführung nach der **Fig. 4** ist die bereits vorgestellte Geschwindigkeitsregelung noch um eine Positionsregelung ergänzt, bei der für einen weiteren oben dargestellten Regler als Eingangsgröße über die inverse Kinematik eine Sollwinkel-Vorgabe für jedes Armsegment oder Glied erfolgt, unter Einbezug von aktuell gemessenen Neigungs- oder Sensorwinkeln ($^{\circ}$) für jedes Armsegment oder Glied **14, 16, 18, 20**. Die Ausgabegrößen beider Regler bilden dann zusammen die bereits angesprochene Sollwertvorgabe (%).

[0034] Die jeweilige Steuerung oder Regelung lässt sich auch derart ausführen, dass der Endeffektor P in X- und Y-Richtung sich unabhängig steuern lässt. Ferner kann der Endeffektor P sich auch von einer ersten Position in eine vorgebbare zweite Position auf der kürzesten Wegstrecke bewegen.

[0035] Die vorliegende Lösung ist nicht auf die Verwendung von Autobetonpumpen eingeschränkt. Sie lässt sich auch für mehrgliedrige Telehandlersysteme einsetzen sowie für Handhabungsgeräte und Roboter einschließlich in Bereichen der Prothetik.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- WO 2014/165888 A1 [0001]

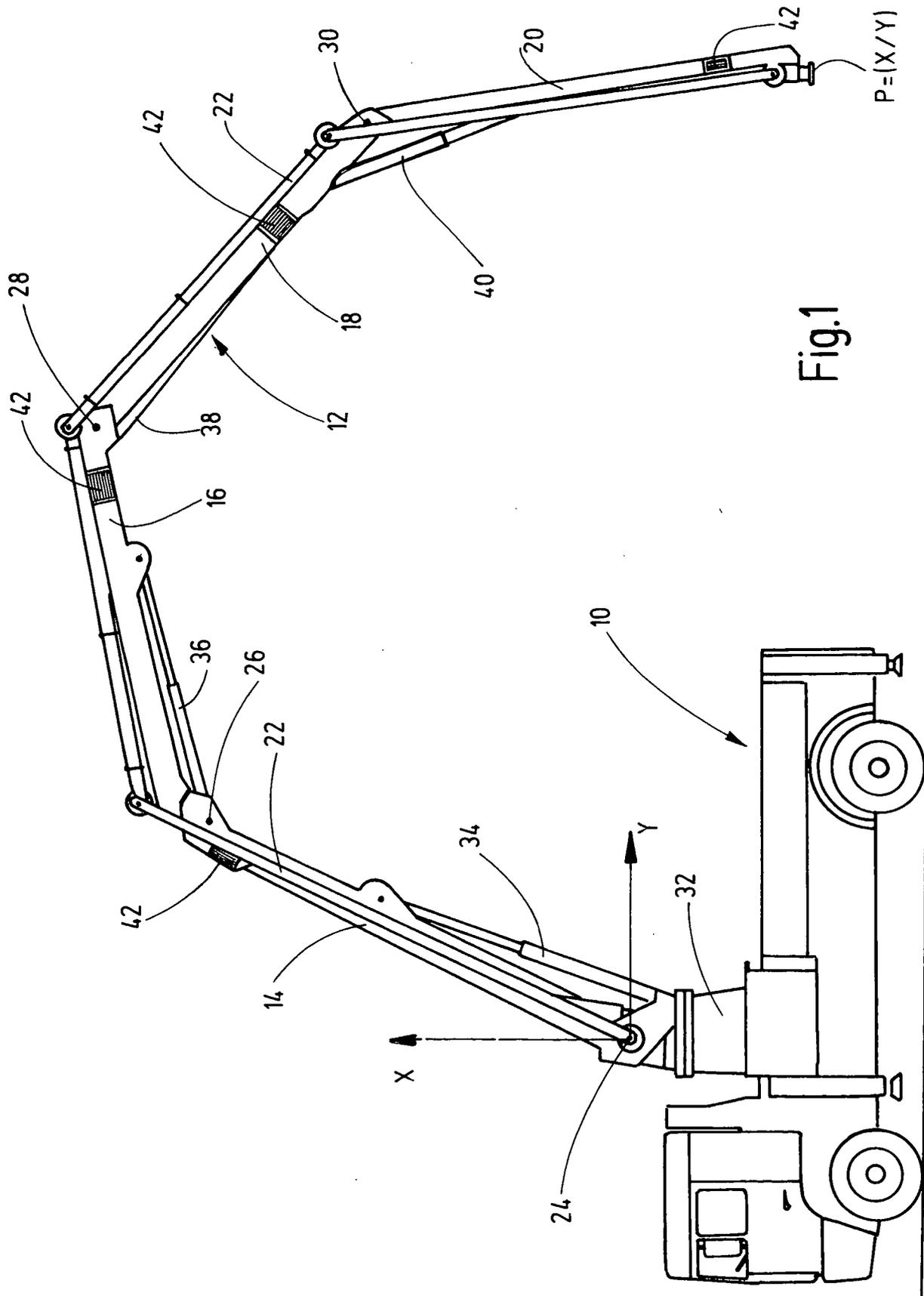
Patentansprüche

1. Verfahren zum Bewegen des letzten Gliedes (20) einer kinematischen Kette (12) oder eines Endeffektors (P) zu einer vorgegebenen Position (X, Y), wobei die Kette aus mindestens drei Gliedern (14, 16, 18, 20) besteht, die jeweils über Gelenkstellen (26, 28, 30) schwenkbar miteinander verbunden sind und die über mindestens einen Aktuator (34, 36, 38, 40) bewegt werden, wobei mittels Sensoren (42) die Neigung sowie die Drehrate zumindest eines Teils der jeweiligen Glieder als Sensormesswerte erfasst werden, und wobei eine Auswerteelektronik die Sensormesswerte in eine Bewegungsabfolge für den jeweiligen Aktuator derart umsetzt, dass eine stetige Bewegung innerhalb der kinematischen Kette (12) erfolgt, bis das letzte Glied (20) oder der Endeffektor (P) die vorgegebene Position (X, Y) erreicht hat.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auswerteelektronik aus den Sensormesswerten der Neigungssensoren (42) zweier benachbarter, über eine Gelenkstelle (26, 28, 30) miteinander verbundener Glieder (14, 16; 16, 18; 18, 20), deren Winkelstellungen ($\phi_1, \phi_2 \dots \phi_{n-1}, \phi_n$) zueinander ermittelt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass jeder Neigungssensor (42) den absoluten Neigungswinkel (grad) bezogen auf den Horizont und jeder Drehratensensor (42) die Winkelgeschwindigkeit (rad/s) über ein CAN-BUS-System an die Auswerteelektronik weitergibt.
4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auswerteelektronik eine Sollwertgenerierung für eine Regelstrecke über eine inverse Kinematik ausgehend von dem letzten zu positionierenden Glied (20) oder dem Endeffektor (P) der kinematischen Kette (12) und die Regelung für die einzelnen Aktuatoren (34, 36, 38, 40) vornimmt.
5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für eine Geschwindigkeitsregelung unter Einsatz der einzelnen Aktuatoren (34, 36, 38, 40) als Eingangsgrößen für die Regelstrecke die Soll-Drehrate (rad/s) für jedes Glied (14, 16, 18, 20) der kinematischen Kette aus der inversen Kinematik erhalten sowie die von den Sensoren (42) gemessenen Ist-Drehraten (rad/s) von jedem Glied (14, 16, 18, 20) verwendet werden.
6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für eine Positions- und Geschwindigkeitsregelung unter Einbezug der einzelnen Aktuatoren (34, 36, 38, 40) neben den Eingangsgrößen für die Geschwindigkeitsregelung als Eingangsgrößen für die Positionsregelung der Soll-Neigungswinkel (grad) für jedes Glied (14, 16, 18, 20) der kinematischen Kette (12) aus der inversen Kinematik erhalten sowie der von den Sensoren (42) gemessene Ist-Neigungswinkel (grad) von jedem Glied (14, 16, 18, 20) verwendet werden.
7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auswerteelektronik die jeweiligen Aktuatoren (34, 36, 38, 40) derart ansteuert, dass
 - ein interner Regelkreis realisiert wird, und/oder
 - der zeitliche Verlauf der von den Gliedern (14, 16, 18, 20) begrenzten Neigungswinkel stetig differenzierbar sind, und/oder
 - beim Verfahren des letzten Gliedes (20) oder des Endeffektors (P) der kinematischen Kette (12) die Drehraten stetig gehalten werden.
8. Vorrichtung zum Durchführen eines Verfahrens nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die einzelnen Glieder (14, 16, 18, 20) einer kinematischen Kette, die über Gelenkstellen (26, 28, 30) schwenkbar miteinander verbunden sind, jeweils einen Neigungssensor (42) und einen Drehratensensor (42) aufweist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neigungs- und der Drehratensensor zu einem Neigungsgeber (42) zusammengefasst sind und ein Multisensorsystem ausbilden, das unter Einsatz eines bewegungs- und beschleunigungskompensierten Messverfahrens die Messwerte von sechs Freiheitsgraden miteinander kombiniert, und dass die Messwerte an ein CAN-BUS-System weiterleitbar sind.
10. Arbeitsmaschine mit einer Vorrichtung nach Anspruch 8 oder 9 zum Durchführen eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die einzelnen Glieder (l_1, l_2, l_{n-1}, l_n) der

kinematischen Kette aus Armsegmenten (**14, 16, 18, 20**) eines Arbeitsarmes (**12**) und die Aktuatoren aus hydraulischen Arbeitszylindern (**34, 36, 38, 40**) gebildet sind.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



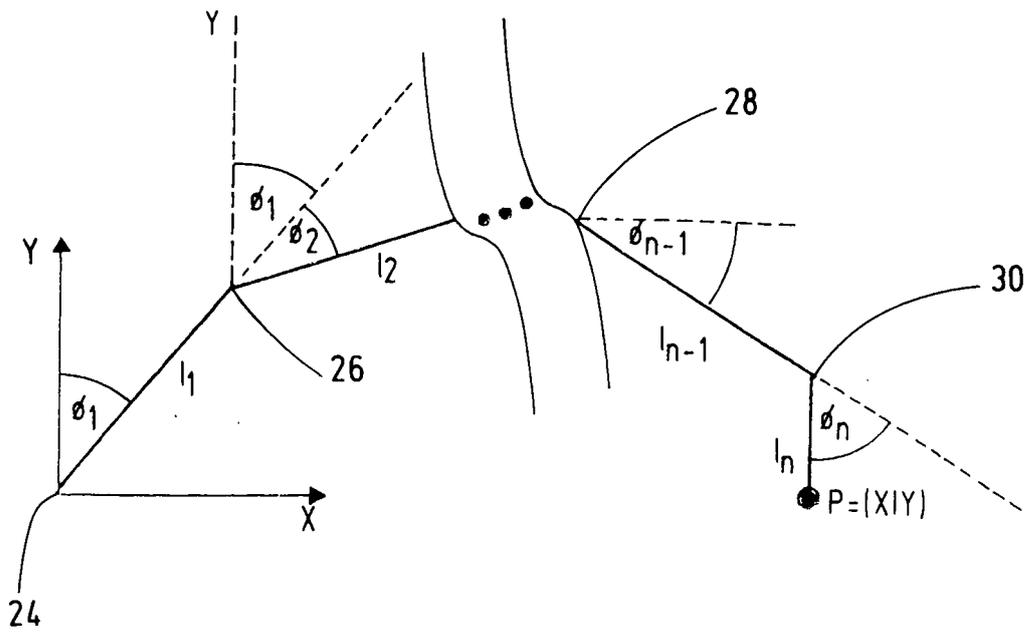


Fig.2

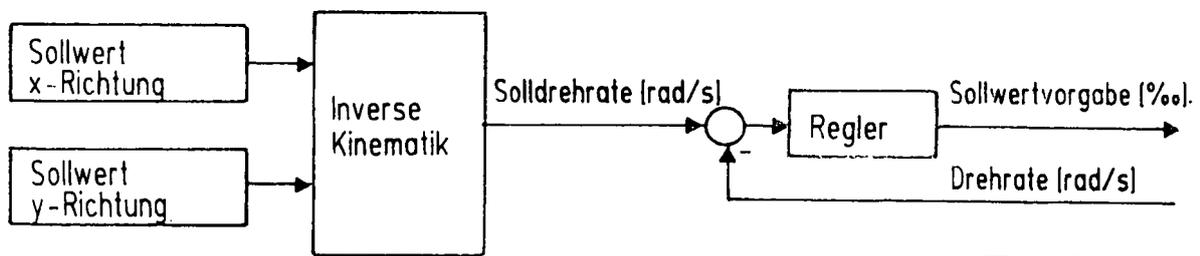


Fig.3

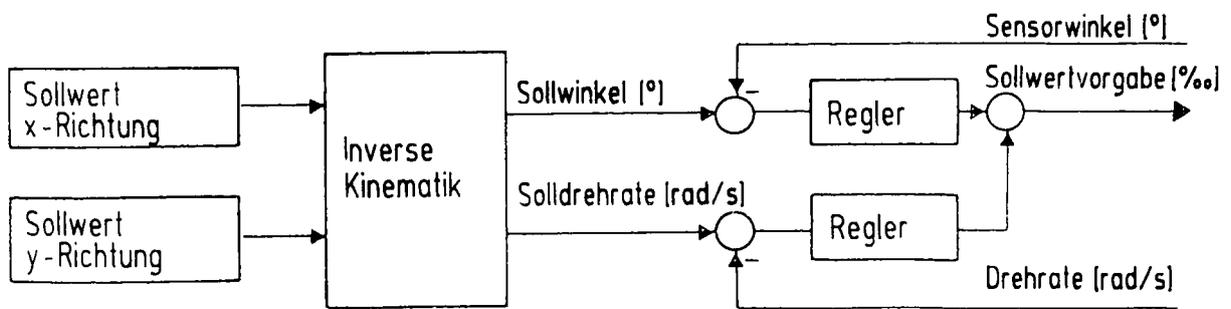


Fig.4