



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2005 048 390 A1** 2007.04.19

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 048 390.9**

(22) Anmeldetag: **10.10.2005**

(43) Offenlegungstag: **19.04.2007**

(51) Int Cl.⁸: **G05B 19/18** (2006.01)

G05B 19/416 (2006.01)

B25J 9/18 (2006.01)

(71) Anmelder:

Siemens AG, 80333 München, DE

(72) Erfinder:

Denk, Joachim, 90419 Nürnberg, DE; Geissdörfer, Klaus, Dr., 91056 Erlangen, DE; Hamann, Jens, Dr., 90765 Fürth, DE; Schäfers, Elmar, Dr., 90419 Nürnberg, DE; Wedel, Bernd, 90408 Nürnberg, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 103 24 692 A1

DE 101 29 141 A1

Unbehauen, Rolf: Systemtheorie, Eine Darstellung für Ingenieure. Oldenbourg Verlag, München, Wien,

4.Aufl., 1983, S.126-135, ISBN 3-486-38454-6;

Lange, F.: Adaptiv vorausplanende Steuerung für schnelle sensorbasierte Roboterbewegung. In:

Elektronisches Volltextarchiv EVA der Universität Karlsruhe (TH), 2003, S.vi-xix, 12-21, 238;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

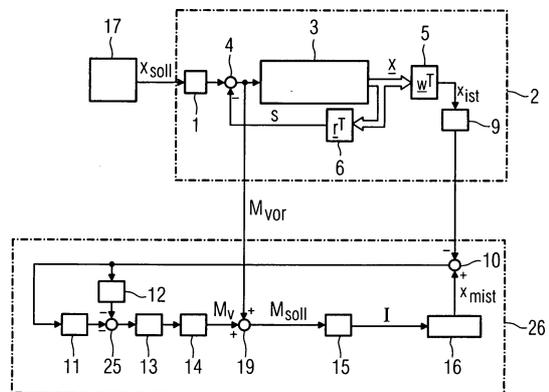
(54) Bezeichnung: **Verfahren und Einrichtung zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer Maschine**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements (18) einer Maschine mit folgenden Verfahrensschritten:

a) Vorgabe einer einen gewünschten Bewegungsvorgang des Maschinenelements (18) beschreibenden Führungsollgröße (x_{soll})

b) Bestimmung einer Vorsteueristgröße (M_{vor}) und/oder einer Führungsistgröße (x_{ist}) aus der Führungsollgröße (x_{soll}) anhand eines Modells (2), wobei das Modell (2) ein Streckenmodell (3) aufweist, das das dynamische Verhalten der an der Bewegung beteiligten Elemente (16, 18) nachbildet.

Weiterhin betrifft die Erfindung eine zu dem Verfahren korrespondierende Einrichtung. Die Erfindung ermöglicht eine optimierte Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements (18) einer Maschine.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements einer Maschine.

[0002] Zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements einer Maschine, wie z.B. einer Werkzeugmaschine, Produktionsmaschine und/oder einem Roboter ist die Erzeugung von Führungssollgrößen, wie z.B. Solllage, Sollgeschwindigkeit und/oder Sollbeschleunigung als Regelsollgrößen für die mit der Steuerung verbundenen Regelungen zur Regelung der für die Verfahrbewegung des Maschinenelements antreibenden Motoren der Maschine, eine der zentralen Aufgaben der Steuerung. Jede Maschine weist dabei in der Regel mehrere Maschinenachsen auf, wobei jede Maschinenachse im Allgemeinen mit Hilfe eines ihr zugeordneten Motors und weiteren Komponenten, wie z.B. einem Getriebe das bewegbare Maschinenelement in Richtung der Maschinenachse bewegen kann, wobei das Maschinenelement z.B. in Form eines Werkzeugschlittens mit einem eingespannten Werkstück und/oder z.B. in Form eines Werkzeugs vorliegen kann. Der Motor, die weiteren Komponenten und das Maschinenelement stellen dabei an der Bewegung beteiligte Elemente dar.

[0003] Heutige Steuerungen berücksichtigen bei der Berechnung der Führungssollgrößen für die einzelnen Maschinenachsen einer Maschine, die Leistungsfähigkeit der betroffenen Maschinenachsen zumeist derart, dass die Führungsgrößen dermaßen erzeugt werden, dass bei der Bewegung des bewegbaren Maschinenelements die zulässigen Grenzwerte nicht überschritten werden. Um darüber hinaus die Anregung kritischer Eigenfrequenzen der an der Bewegung beteiligten Elemente zu vermeiden, werden handelsüblich verschiedene Maßnahmen durchgeführt, die jedoch mit teilweise erheblichen Einbußen an der Dynamik des Bewegungsvorgangs des bewegbaren Maschinenelements verbunden sind. Eine dieser Maßnahmen stellt z.B. die so genannte Ruckbegrenzung dar. Die Änderung der Beschleunigung, d.h. der Ruck, wird entsprechend bestimmter Profile vorgegeben oder innerhalb definierter Schranken gehalten. Insbesondere bei Werkzeugmaschinen wird die Bahngeschwindigkeit der durchzuführenden Bewegung soweit reduziert, bis die Ruckbegrenzungen der einzelnen Maschinenachsen eingehalten werden und der auf der Bahn definierte Bahnrick nicht überschritten wird. Eine gezielte Anpassung an das Schwingungsverhalten ist, insbesondere bei Werkzeugmaschinenanwendungen, somit nur sehr eingeschränkt möglich. Für eine hinreichende Fertigungsgenauigkeit muss der Ruck stark reduziert werden, so dass die Dynamik wesentlich beschränkt wird, was zu höheren Fertigungskosten führt.

[0004] Eine weitere bekannte Möglichkeit stellt die Verwendung von so genannten Kurvenscheiben dar. Bei vielen Anwendungen, insbesondere bei Produktionsmaschinen, werden die einzelnen Werte der Führungssollgrößen anhand von Kurvenscheiben generiert. Die Kurvenscheibenverläufe setzen sich dabei aus Polynomen zusammen. Eine geringe Schwingungsanregung soll dabei z.B. mittels heuristischer Festlegung erreicht werden (Kurvenscheiben möglichst "weich", Verwendung vom Polynom hoher Ordnung). Mit einer Anpassung an das mechanische Schwingungsverhalten der an der Bewegung beteiligten Elemente kann eine entsprechende Verlangsamung des Prozesses verbunden sein, was ebenfalls schon die oben genannten Nachteile mit sich bringt.

[0005] Eine weitere bekannte Möglichkeit zur Reduktion der Schwingungsbelastung stellen so genannte lineare Führungssollgrößenfilter dar. Mittels linearer Filter werden dabei die spektralen Anteile im Bereich kritischer Frequenzen vermindert. Mit einer solchen Filterung ist jedoch immer eine Signalverzögerung verbunden. Insbesondere bei Werkzeugmaschinen entstehen dadurch Ungenauigkeiten in der Fertigung.

Stand der Technik

[0006] Aus der deutschen Patentanmeldung mit dem amtlichen Aktenzeichen 10 2005 036 848.4 ist ein Verfahren und eine Einrichtung zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements einer Maschine bekannt. Bei diesen Verfahren werden z.B. bei Eingabe der Endlage und/oder Anfangslage einer durchzuführenden Verfahrbewegung des Maschinenelements eine optimierte Verfahrbewegung des bewegbaren Maschinenelements anhand eines Modells, eines vorgegebenen Gütefunktional und von Beschränkungen der Verfahrbewegung der Maschinenachse bestimmt.

Aufgabenstellung

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine optimierte Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements einer Maschine zu ermöglichen.

- [0008]** Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements einer Maschine mit folgenden Verfahrensschritten
- Vorgabe einer einen gewünschten Bewegungsvorgang des Maschinenelements beschreibenden Führungssollgröße
 - Bestimmung einer Vorsteueristgröße und/oder einer Führungsistgröße aus der Führungssollgröße anhand eines Modells, wobei das Modell ein Streckenmodell aufweist, das das dynamische Verhalten der an der Bewegung beteiligten Elemente nachbildet.
- [0009]** Weiterhin wird diese Aufgabe gelöst durch eine Einrichtung zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements einer Maschine, wobei die Einrichtung aufweist,
- ein Führungssollgrößenerzeugungsmittel zur Vorgabe einer einen gewünschten Bewegungsvorgang des Maschinenelements beschreibenden Führungssollgröße
 - ein Modell, wobei das Modell ein Streckenmodell aufweist, das das dynamische Verhalten der an der Bewegung beteiligten Elemente nachbildet, wobei anhand des Modells eine Bestimmung einer Vorsteueristgröße und/oder einer Führungsistgröße aus der Führungssollgröße durchführbar ist.
- [0010]** Es erweist sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn die Einspeisung der Vorsteueristgröße und/oder der Führungsistgröße in einen Regelkreis zur Regelung eines Motors der Maschine erfolgt. Hierdurch wird eine optimierte Regelung des Motors ermöglicht.
- [0011]** Weiterhin erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn das Verfahren in Echtzeit während des Bewegungsvorgangs des Maschinenelements durchgeführt wird. Hierdurch wird während des Fertigungsvorgangs eine optimierte Bewegungsführung ermöglicht, ohne dass im Vorfeld aufwendige Berechnungen notwendig sind.
- [0012]** Weiterhin erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens ausschließlich die mechanischen Eigenschaften der beteiligten Elemente im Streckenmodell nachgebildet sind, da ein solches Streckenmodell besonders einfach aufgestellt werden kann.
- [0013]** Weiterhin erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn als Modell ein geregeltes Streckenmodell verwendet wird. Eine Realisierung des Modells als geregeltes Streckenmodell kann besonders einfach realisiert werden.
- [0014]** In diesem Zusammenhang erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn als Modell ein geregeltes lineares Streckenmodell verwendet wird, welches mittels eines linearen Regelgesetzes geregelt wird. Eine Realisierung des Modells als geregeltes lineares Streckenmodell kann besonders einfach realisiert werden.
- [0015]** Ferner erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn eine mittels einer Rückführgröße, modifizierte Ausgangsgröße des Streckenmodells auf eine Eingangsgröße des Streckenmodells zurückgeführt wird. Durch diese Maßnahme lässt sich auf einfache Art und Weise eine Regelung erzielen.
- [0016]** Ferner erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn als Führungssollgröße eine Solllage, eine Sollgeschwindigkeit oder eine Sollbeschleunigung vorgesehen ist. Eine Solllage, eine Sollgeschwindigkeit oder eine Sollbeschleunigung stellen technisch üblich verwendende Führungssollgrößen dar.
- [0017]** Weiterhin erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn die Führungsistgröße zeitlich verzögert wird, bevor sie in den Regelkreis zur Regelung eines Motors der Maschine eingespeist wird. Hierdurch ist eine zeitliche Anpassung der Führungsistgröße an das zeitliche Verhalten des Leistungsteils (z.B. an den Umrichter), der die Energieversorgung des Motors steuert, möglich.
- [0018]** Ferner erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn der Regelkreis einen Lageregler aufweist, wobei die Differenz aus Führungsistgröße und einer gemessenen Istgröße dem Lageregler zur Regelung des Motors zugeführt wird. Hierdurch wird eine optimierte Lageregelung ermöglicht.
- [0019]** Ferner erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn der Regelkreis einen Geschwindigkeitsregler aufweist, wobei die Summe aus Ausgangssignal des Geschwindigkeitsreglers und der Vorsteueristgröße gebildet wird, wobei die solchermaßen gebildete Summe die Höhe des Motorstroms beeinflusst. Hierdurch wird eine besonders optimierte Bewegungsführung ermöglicht.

[0020] Ferner erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn die Maschine als Werkzeugmaschine, Produktionsmaschine und/oder als Roboter ausgebildet ist. Insbesondere bei Werkzeugmaschinen, Produktionsmaschinen und/oder Robotern treten z.B. Schwingungsproblematiken bei der Bewegungsführung auf. Selbstverständlich lässt sich die Erfindung aber auch bei anderen Arten von Maschinen verwenden.

[0021] Weiterhin erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn eine Einspeisung der Vorsteueristgröße und/oder der Führungsistgröße in einen Regelkreis zur Regelung eines Motors der Maschine erfolgt. Hierdurch wird eine optimierte Regelung des Motors ermöglicht.

[0022] Ferner erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn der Regelkreis einen Lageregler aufweist, wobei die Differenz aus Führungsistgröße und einer gemessenen Istgröße dem Lageregler zur Regelung des Motors zugeführt wird. Hierdurch wird eine optimierte Regelung des Motors ermöglicht.

[0023] Weiterhin erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, wenn der Regelkreis einen Geschwindigkeitsregler aufweist, wobei die Summe aus Ausgangssignal des Geschwindigkeitsreglers und der Vorsteueristgröße gebildet wird, wobei die solchermaßen gebildete Summe die Höhe des Motorstroms beeinflusst. Hierdurch wird eine optimierte Regelung des Motors ermöglicht.

[0024] Ferner erweist es sich für die Erfindung als vorteilhaft, dass ein Computerprogrammprodukt für die erfindungsgemäße Einrichtung vorgesehen ist, das Codeabschnitte enthält, mit der das Verfahren ausführbar ist.

[0025] Vorteilhafte Ausführung des Verfahrens ergeben sich analog zur vorteilhaften Ausführung der Einrichtung und umgekehrt.

Ausführungsbeispiel

[0026] Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird im Folgenden näher erläutert. Dabei zeigen:

[0027] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung eines Zweimassenschwingers,

[0028] [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Verfahrens und einer erfindungsgemäßen Einrichtung zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements einer Maschine und

[0029] [Fig. 3](#) eine allgemeine schematische Darstellung der Erfindung.

[0030] [Fig. 1](#) zeigt die schematische Darstellung eines Zweimassenschwingers bestehend aus einem Motor **16**, der mit einer Last **18** verbunden ist. Der Motor **16** weist eine Motorträgheit J_M und ein Motormoment M_M auf. Die Last **18** weist eine Lastträgheit J_L auf. Die Verbindung zwischen dem Motor **16** und der Last **18** weist eine Steifigkeit c und eine Dämpfung d auf. Die Verbindung kann z.B. in Form eines Getriebes vorliegen. Wenn sich die Lage x_M des Rotors des Motors **16** verändert (x_M = Rotorlagewinkel), verändert sich unter anderem infolge der endlichen Torsionssteifigkeit, insbesondere für den dynamischen Fall die Lage der Last x_L nicht wie es durch eine reine Veränderung der Lage des Motors x_M zu erwarten gewesen wäre, sondern die Lage der Last x_L fängt gegenüber der Lage des Motors x_M an zu schwingen. Die Systemdynamik des Zweimassenschwingers aus [Fig. 1](#) mit dem Motormoment M_M wird mathematisch durch das System von Differenzialgleichungen

$$\begin{aligned} J_M \cdot \ddot{x}_M + d \cdot (\dot{x}_M - \dot{x}_L) + c \cdot (x_M - x_L) &= M_M \\ J_L \cdot \ddot{x}_L - d \cdot (\dot{x}_M - \dot{x}_L) - c \cdot (x_M - x_L) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

beschrieben. Hieraus resultiert nach den Substitutionen

$$x_1 = x_M = x_M(t), \quad x_2 = x_L, \quad x_3 = \dot{x}_M = v_M(t), \quad x_4 = \dot{x}_L, \quad u = M_M = m_M(t) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_3 \\ \dot{x}_2 &= x_4 \\ \dot{x}_3 &= J_M^{-1} \cdot [-d \cdot (x_3 - x_4) - c \cdot (x_1 - x_2) + u] \\ \dot{x}_4 &= J_L^{-1} \cdot [d \cdot (x_3 - x_4) + c \cdot (x_1 - x_2)] \end{aligned} \quad (3)$$

oder kurz

$$\underline{\dot{x}} = \underline{A} \cdot \underline{x} + \underline{b} \cdot u \quad (4)$$

mit dem Zustandsvektor

$$\underline{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T \quad (5)$$

und

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -J_M^{-1} \cdot c & J_M^{-1} \cdot c & -J_M^{-1} \cdot d & J_M^{-1} \cdot d \\ J_M^{-1} \cdot c & -J_M^{-1} \cdot c & J_M^{-1} \cdot d & -J_M^{-1} \cdot d \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0031] Im Rahmen des Ausführungsbeispiels wird die Maschinenachse der Maschine durch den Motor **16**, durch die Last **18** und durch die Verbindung zwischen dem Motor **16** und der Last **18**, wobei die Verbindung die Steifigkeit c und eine Dämpfung d aufweist, gebildet. D.h. die an der Bewegung beteiligten Elemente werden durch den Motor **16**, durch die Verbindung und durch die Last **18** gebildet.

[0032] Im Rahmen des Ausführungsbeispiels werden in dem oben beschriebenen Streckenmodell zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens der an der Bewegung beteiligten Elemente ausschließlich die mechanischen Eigenschaften der beteiligten Elemente im Streckenmodell nachgebildet. Das Streckenmodell kann solchermaßen besonders einfach aufgestellt werden. Prinzipiell ist es aber auch möglich, auch das Verhalten eines den Motors **16** ansteuernden Leistungsteils (z.B. Umrichter) in der Modellbildung zu berücksichtigen. Dies hat jedoch den Nachteil, dass das Streckenmodell abhängig von der Parametrierung des Leistungsteils wird. Mittels einem dem Streckenmodell nachgeschalteten Verzögerers kann dagegen das Verhalten des Leistungsteils, sowie eventuell weiterer im Modell nicht berücksichtigter Verzögerungen, unabhängig vom Entwurf des Streckenmodells eingebracht werden.

[0033] In [Fig. 2](#) ist im Rahmen einer schematischen Darstellung ein erfindungsgemäßes Verfahren und eine erfindungsgemäße Einrichtung zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements einer Maschine dargestellt. Die Einrichtung kann dabei z.B. in Form einer numerischen Steuerung und/oder einer Regeleinrichtung der Maschine vorliegen. Die Einrichtung weist ein Führungsgrößenerzeugungsmittel **17** auf, das eine den gewünschten Bewegungsvorgang des Maschinenelements, d.h. im Ausführungsbeispiel der Last **18**, beschreibende Führungsollgröße x_{soll} , die im Rahmen des Ausführungsbeispiels als Führungsolllage vorliegt, erzeugt und solchermaßen vorgibt. Anstatt einer Lage könnte jedoch auch eine Geschwindigkeit oder eine Beschleunigung vom Führungsollgrößenerzeugungsmittel **17** vorgegeben werden. Das Führungsgrößenerzeugungsmittel **17** ist als Bestandteil der numerischen Steuerung bei Maschinen, wie z.B. Werkzeugmaschinen, Produktionsmaschinen und/oder Robotern handelsüblich vorhanden. Die Führungsollgröße x_{soll} wird dabei handelsüblich als Sollgröße einem nachgeschalteten Regelkreis zugeführt, der den Bewegungsvorgang des zu bewegenden Maschinenelements entsprechend der vorgegebenen Führungsollgröße x_{soll} regelt.

[0034] Erfindungsgemäß werden nun zwischen den Führungsollgrößenerzeugungsmittel **17** und dem Regelkreis **26** ein Modell **2** zur Bestimmung einer Führungsistgröße x_{ist} und/oder einer Vorsteueristgröße M_{vor} zwischengeschaltet. Die Vorsteueristgröße M_{vor} liegt im Rahmen des Ausführungsbeispiels als Vorsteuermoment vor und die Führungsistgröße x_{ist} liegt im Rahmen des Ausführungsbeispiels als Lagemodellistgröße vor. Das Modell **2** weist dabei das schon oben beschriebene Streckenmodell **3** und einen Zustandsregler auf, der in Form eines Rückführvektors **6** und eines Anpassglieds **1** realisiert ist. Weiterhin weist das Modell **2** einen Anpassvektor \underline{w} (siehe Bezugszeichen **5**) auf. Im Rahmen des Ausführungsbeispiels liegt das Modell **2** in Form eines geregelten Streckenmodells vor, bei dem eine mittels einer Rückführgröße (siehe Bezugszeichen **6**), die im Rahmen des Ausführungsbeispiels als Rückführvektor \underline{r} ausgebildet ist, modifizierte Ausgangsgröße des Streckenmodells, die im Rahmen des Ausführungsbeispiels als Zustandvektor \underline{x} ausgebildet ist, auf eine Eingangsgröße des Streckenmodells **3** zurückgeführt wird. Mit Hilfe des Streckenmodells **3** wird das mechanische

Verhalten des Motors **16**, der Last **18** und der mechanischen Verbindung zwischen Motor **16** und Last **18** nachgebildet und solchermaßen das dynamische Verhalten der bei der Bewegung beteiligten Elemente nachgebildet. Mit Hilfe des Zustandsreglers werden unerwünschte Eigenschaften der an der Bewegung beteiligten Elemente solchermaßen vorab ausgeregelt und die Vorsteueristgröße M_{vor} und die Führungsistgröße x_{ist} bestimmt. Der Rückführvektor \underline{r} (siehe Bezugszeichen **6**), der aus dem Zustandsvektor \underline{x} eine skalare Größe s macht, weist im Rahmen des Ausführungsbeispiels die Form

$$\underline{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

auf, mit den Rückführkoeffizienten r_1, r_2, r_3 und r_4 , wobei gilt

$$s = \underline{x} \cdot \underline{r}^T \quad (9)$$

[0035] Der zur Erzeugung der skalaren Führungsistgröße x_{ist} notwendige Anpassvektor \underline{w} , der aus dem Zustandsvektor \underline{x} die skalare Führungsistgröße x_{ist} macht, weist im Rahmen des Ausführungsbeispiels die Form

$$\underline{w} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

1 auf, wobei gilt

$$x_{\text{ist}} = \underline{x} \cdot \underline{w}^T \quad (11)$$

[0036] Für eine Regelstrecke, die in einer Form gemäß der Beziehung **(4)** beschrieben ist mit einer Stellgröße u , kann die Berechnung der Rückführkoeffizienten r_1, r_2, r_3 und r_4 des Rückführvektors \underline{r} beispielsweise mit Hilfe der regelungstechnisch allgemein bekannten so genannten Ackermannformel erfolgen: Dabei gilt:

$$\underline{r}^T = \underline{t}_a^T \cdot p(A) \quad (12)$$

[0037] Dabei ist $p(A)$ das charakteristische Polynom des geregelten Systems, ergibt sich also aus den gewünschten Eigenwerten des geregelten Systems mit

$$p(s) = s^n + p_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + p_1 \cdot s + p_0 \quad (13)$$

\underline{t}_a^T ist dabei die letzte Zeile der inversen Steuerbarkeitsmatrix \underline{Q}_s^{-1} mit

$$\underline{Q}_s^{-1} = [\underline{b}, \underline{A} \cdot \underline{b}, \dots, \underline{A}^{n-1} \cdot \underline{b}]^{-1}. \quad (14)$$

[0038] Steuerbarkeit der Regelstrecke ist dabei offensichtlich vorauszusetzen. Bei den hier betrachteten Systemen ist Steuerbarkeit aber immer gegeben.

[0039] Die Rückführgröße \underline{r} kann dabei z.B. so gewählt werden, dass eine einzelne oder mehrere Eigenschwingungsfrequenzen des Streckenmodells **3** gedämpft werden. Mit Hilfe des Anpassglieds **1**, das z.B. in Form eines Vorfilters vorliegen kann, lässt sich die Gesamtverstärkung des Modells **2** beeinflussen. So kann das Anpassglied **1** im einfachsten Fall in einer Multiplikation der Führungssollgröße x_{soll} mit einem konstanten Faktor (z.B. 1,5) bestehen. Mit Hilfe eines Subtrahierers **4** wird die mittels der Rückführgröße \underline{r} modifizierte Ausgangsgröße \underline{x} (Zustandsvektor) des Streckenmodells **3** von der durch das Anpassglied **1** modifizierten Führungssollgröße x_{soll} subtrahiert und das solchermaßen vom Subtrahierer **4** erzeugte Ausgangssignal, das die Vorsteueristgröße M_{vor} darstellt, dem Streckenmodells **3** als Eingangsgröße zugeführt. Dieses gibt als Ausgangsgröße den Zustandsvektor \underline{x} aus, wobei anschließend mittels des Anpassvektors \underline{w} , die skalare Führungsistgröße x_{ist} erzeugt wird. Mit Hilfe eines nachgeschalteten Verzögerers **9** wird die Führungsistgröße X_{ist} entsprechend der Verzögerung des Leistungsteils **15** (Zeit, die das Leistungsteil **15** benötigt um den Strom I

aufzubauen) verzögert und am Ausgang des Verzögerers **9** ausgegeben. Die Verzögerung muss jedoch nicht unbedingt durchgeführt werden.

[0040] Die solchermaßen bestimmte Vorsteueristgröße M_{vor} und die verzögerte Führungsistgröße x_{ist} werden in den Regelkreis **26** zur Regelung des Motors **16** eingespeist. Mit Hilfe eines Subtrahierers **10** wird die verzögerte Führungsistgröße x_{ist} von einer, z.B. mittels eines Gebers, gemessenen Istgröße x_{mist} , die in dem Ausführungsbeispiel in Form einer am Motor gemessenen Lage (x_{mist} = Rotorlagewinkel) vorliegt, berechnet. Die solchermaßen berechnete Differenz wird anschließend einem Differenzierer **12**, der die zeitliche Ableitung ermittelt und an einen Lageregler **11** weiterleitet, zugeführt. Die Ausgangsgröße des Differenzierers **12** und des Lagereglers **11** werden negiert und mit Hilfe eines Addierers **25** addiert. Die Ausgangsgröße des Addierers **25** wird einem Geschwindigkeitsregler **13** als Eingangsgröße zugeführt. Die Ausgangsgröße des Geschwindigkeitsreglers **13** wird anschließend mit Hilfe eines Filters **14**, der nicht notwendigerweise vorhanden sein braucht, gefiltert um eventuell noch auftretende unerwünschte Eigenschaften im Frequenzgang herauszufiltern. Das Ausgangssignal M_v (Regleristmoment) des Filters **14** wird mit Hilfe eines Addierers **19** zur Vorsteueristgröße M_{vor} (Vorsteuermoment) addiert und solchermaßen das Sollmoment M_{soll} berechnet. Das Sollmoment M_{soll} wird anschließend als Eingangsgröße dem Leistungsteil **15** zugeführt, das z.B. in Form eines Umrichters mit zugehöriger Ansteuerlektronik vorliegenden kann, wobei das Leistungsteil **15** entsprechend dem Sollmoment M_{soll} die Höhe des Motorstroms I beeinflusst und solchermaßen den Bewegungsvorgang des Maschinenelements steuert.

[0041] Zur Realisierung des Modells **2** sind einige Vereinfachungen möglich. So muss nicht wie im Ausführungsbeispiel eine rückgekoppelte Modellstruktur implementiert werden, sondern es ist ausreichend, das Modell **2** mit Hilfe linearer Differenzgleichungen, die aus einer Führungssollgröße eine Vorsteueristgröße und/oder eine Führungsistgröße berechnen, zu realisieren.

[0042] Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das in [Fig. 2](#) dargestellte Modell **2** und der Regelkreis **18** im Rahmen des Ausführungsbeispiels für jede Maschinenachse der Maschine vorhanden ist, wobei das Führungssollgrößenerzeugungsmittel **17** für jede Maschinenachse eine ihr zugehörige Führungssollgröße x_{soll} erzeugt und dem jeweilig zugehörigen Modell als Eingangsgröße vorgibt.

[0043] In [Fig. 3](#) ist noch einmal die allgemeine erfinderische Idee des Verfahrens und der Einrichtung dargestellt, wobei der allgemeine Fall dargestellt ist, bei dem die einzelnen Maschineachsen miteinander verknüpft sein können, das heißt z. B. eine Lageveränderung einer Maschinenachse bewirkt automatisch auch eine Lageveränderung von anderen Maschinenachsen (z. B. bei einem Roboterarm mit mehreren Gelenken). Mit Hilfe eines Sollwerterzeugungsmittels **17'** wird eine einzelne oder mehrere Führungssollgrößen wie z. B. eine Solllage x_{soll} , eine Sollgeschwindigkeit v_{soll} und/oder eine Sollbeschleunigung a_{soll} , einem Modell **2'** als Eingangsgrößen vorgegeben. Die einzelnen Größen können dabei, entsprechend der Anzahl der zu bewegendenden Maschinenachsen, als Vektor vorliegen. Das Modell **2'** ermittelt dabei für die einzelnen Maschinenachsen der Maschine eine einzelne oder mehrere Führungsistgrößen wie z. B. eine Momentenistgröße M_{ist} , eine Geschwindigkeitsistgröße v_{ist} und/oder eine Beschleunigungsistgröße a_{ist} . Diese Größen können ebenfalls als Vektor vorliegen. Sie werden mit Hilfe eines Verzögerers **9'** entsprechend der zeitlichen Verzögerung des Leistungsteils **15** verzögert. An dem Motor **16'** und/oder von einer anderen Stelle werden gemessene Größen wie z.B. eine gemessene Lageistgröße x_{mist} , eine gemessene Geschwindigkeitsistgröße v_{mist} und/oder gemessene Beschleunigungsistgröße a_{mist} , wobei die Größen auch als Vektor vorliegen können, von dem vom Modell **2'** berechneten verzögerten Führungsgrößen mittels eines Subtrahierers **10'** abgezogen und die Differenz einer Regelung **20'** zugeführt. Diese ermitteln als Ausgangsgröße das Regelmoment M_v , wobei anschließend mittels eines Addierers **19** die Vorsteuergröße M_{vor} von den Regelmoment M_v addiert wird und solchermaßen ein Sollmoment M_{soll} bestimmt wird und als Eingangsgröße einem Leistungsteil **15** zugeführt wird (M_{vor} , M_v und M_{soll} können dabei ebenfalls als Vektor vorliegen). Das Leistungsteil **15'** liefert dabei die Ströme I für die einzelnen Motoren **16'** zum Bewegen der Maschinenachse der Maschine. Somit kann der allgemeine erfinderische Ansatz auch bei Maschinen, bei denen gekoppelten Maschinenachsen vorliegen, mit Hilfe eines Modells **2'**, dass auch die Kopplungen der Maschinenachsen berücksichtigt, realisiert werden.

[0044] Mit Hilfe der Erfindung kann z.B. bei der Erzeugung der Führungssollgrößen auf eine eng eingestellte Ruckbegrenzung und/oder den Einsatz von linearen Führungsgrößenfiltern verzichtet werden und somit insbesondere das dynamische Verhalten der Bewegung verbessert werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements (**18**) einer Maschine mit fol-

genden Verfahrensschritten

a) Vorgabe einer einen gewünschten Bewegungsvorgang des Maschinenelements (**18**) beschreibenden Führungssollgröße (x_{soll})

b) Bestimmung einer Vorsteueristgröße (M_{vor}) und/oder einer Führungsistgröße (x_{ist}) aus der Führungssollgröße (x_{soll}) anhand eines Modells (**2**), wobei das Modell (**2**) ein Streckenmodell (**3**) aufweist, dass das dynamische Verhalten der an der Bewegung beteiligten Elemente (**16**, **18**) nachbildet.

2. Verfahren nach Anspruch 1 mit folgendem weiteren Verfahrensschritt,

c) Einspeisung der Vorsteueristgröße (M_{vor}) und/oder der Führungsistgröße (x_{ist}) in einen Regelkreis (**26**) zur Regelung eines Motors (**16**) der Maschine.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren in Echtzeit während des Bewegungsvorgangs des Maschinenelements (**18**) durchgeführt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens ausschließlich die mechanischen Eigenschaften der beteiligten Elemente im Streckenmodell (**3**) nachgebildet sind.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als Modell (**2**) ein geregeltes Streckenmodell verwendet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Modell (**2**) ein geregeltes lineares Streckenmodell verwendet wird, welches mittels eines linearen Regelgesetzes geregelt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, dass eine mittels einer Rückführgröße (r), modifizierte Ausgangsgröße (\underline{x}) des Streckenmodells (**3**) auf eine Eingangsgröße des Streckenmodells zurückgeführt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als Führungssollgröße eine Solllage (x_{soll}), eine Sollgeschwindigkeit (v_{soll}) oder eine Sollbeschleunigung (a_{soll}) vorgesehen ist.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Führungsistgröße (x_{ist}) zeitlich verzögert wird, bevor sie in den Regelkreis (**26**) zur Regelung eines Motors (**16**) der Maschine eingespeist wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Regelkreis (**26**) einen Lageregler (**11**) aufweist, wobei die Differenz aus Führungsistgröße (x_{ist}) und einer gemessenen Istgröße (x_{mist}) dem Lageregler (**11**) zur Regelung des Motors (**16**) zugeführt wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Regelkreis (**26**) einen Geschwindigkeitsregler (**13**) aufweist, wobei die Summe aus Ausgangssignal (M_v) des Geschwindigkeitsreglers (**13**) und der Vorsteueristgröße (M_{vor}) gebildet wird, wobei die solchermaßen gebildete Summe die Höhe des Motorstroms (I) beeinflusst.

12. Verfahren einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Maschine als Werkzeugmaschine, Produktionsmaschine und/oder als Roboter ausgebildet ist.

13. Einrichtung zur Bewegungsführung eines bewegbaren Maschinenelements einer Maschine, wobei die Einrichtung aufweist,

– ein Führungssollgrößenerzeugungsmittel (**17**) zur Vorgabe einer einen gewünschten Bewegungsvorgang des Maschinenelements (**18**) beschreibenden Führungssollgröße (x_{soll})

– ein Modell (**2**), wobei das Modell (**2**) ein Streckenmodell (**3**) aufweist, das das dynamische Verhalten der an der Bewegung beteiligten Elemente (**16**, **18**) nachbildet, wobei anhand des Modells (**2**) eine Bestimmung einer Vorsteueristgröße (M_{vor}) und/oder einer Führungsistgröße (x_{ist}) aus der Führungssollgröße (x_{soll}) durchführbar ist.

14. Einrichtung nach Anspruch 13, wobei eine Einspeisung der Vorsteueristgröße (M_{vor}) und/oder der Führungsistgröße (x_{ist}) in einen Regelkreis (**26**) zur Regelung eines Motors (**16**) der Maschine erfolgt.

15. Einrichtung nach Anspruch 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Regelkreis **(26)** einen Lageregler **(11)** aufweist, wobei die Differenz aus Führungsgröße (x_{ist}) und einer gemessenen Istgröße (x_{mist}) dem Lageregler **(11)** zur Regelung des Motors **(16)** zugeführt wird.

16. Einrichtung nach Anspruch 13, 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Regelkreis **(26)** einen Geschwindigkeitsregler aufweist, wobei die Summe aus Ausgangssignal (M_v) des Geschwindigkeitreglers **(13)** und der Vorsteuergröße gebildet wird, wobei die solchermaßen gebildete Summe die Höhe des Motorstroms (I) beeinflusst.

17. Einrichtung nach Anspruch 13, 14, 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Maschine als Werkzeugmaschine, Produktionsmaschine und/oder als Roboter ausgebildet ist.

18. Computerprogrammprodukt für eine Einrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 17, das Codeabschnitte enthält mit der ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12 ausführbar ist.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

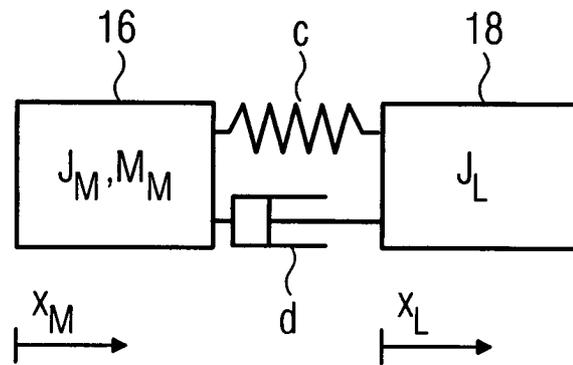


FIG 2

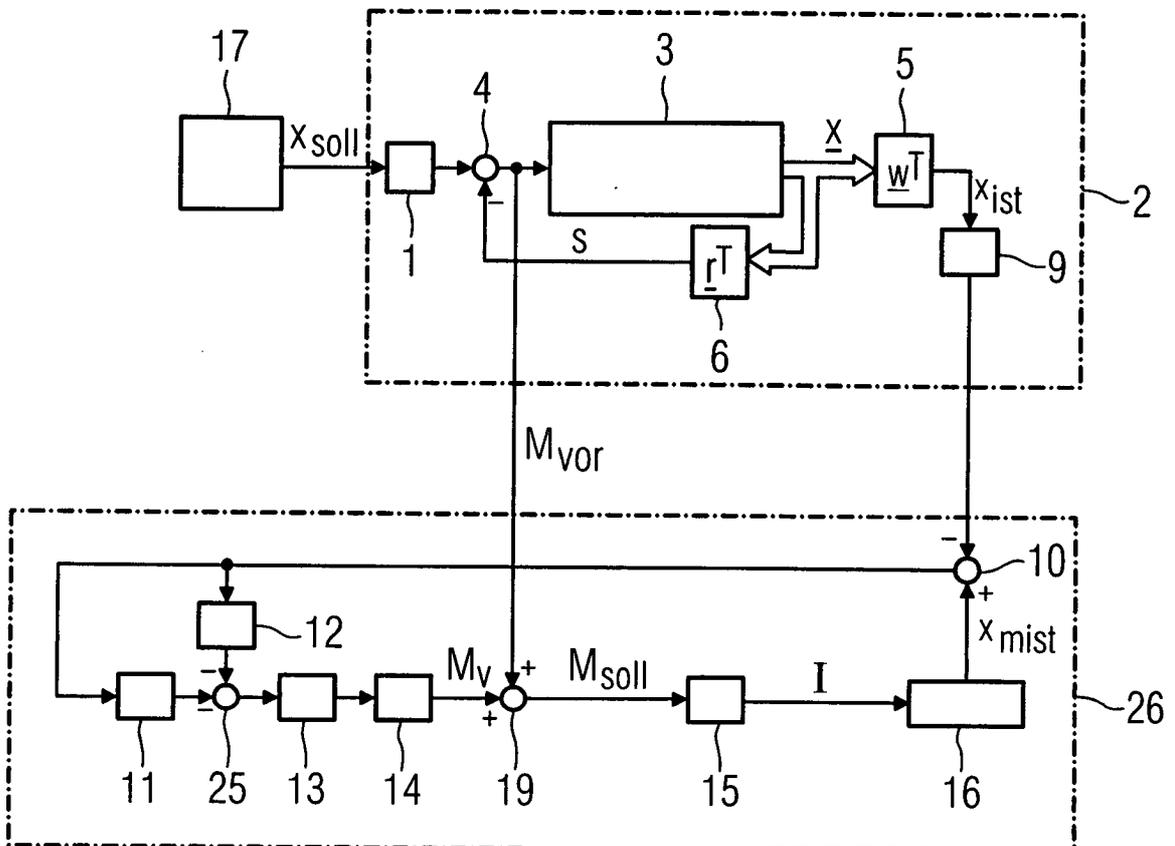


FIG 3

