

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
25. Juli 2019 (25.07.2019)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2019/141706 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
B25J 9/16 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/051001

(22) Internationales Anmeldedatum:
16. Januar 2019 (16.01.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2018 200 864.7
19. Januar 2018 (19.01.2018) DE

(71) Anmelder: KUKA DEUTSCHLAND GMBH [DE/DE];
Zugspitzstraße 140, 86165 Augsburg (DE).

(72) Erfinder: SHARMA, Shashank; Lindenstr. 6, 86153
Augsburg (DE).

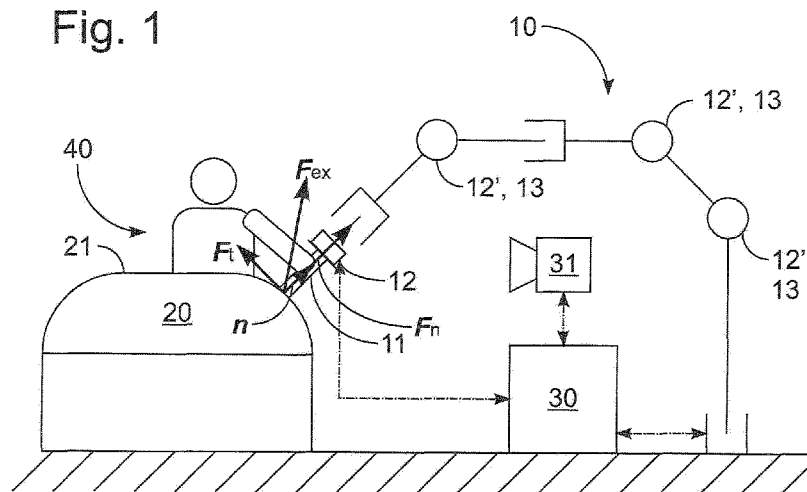
(74) Anwalt: TILLMANN, Axel; Zugspitzstr. 140, 86165
Augsburg (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR CONTROLLING A ROBOT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND SYSTEM ZUM STEuern EINES ROBOTERS



(57) Abstract: In a method according to the invention for controlling a robot (10) depending on an external force (F_{ex}) applied to the robot, the robot is controlled (S50) in a first operating mode depending on a surface (21) in such a way that, with the surface, said robot attempts to follow a tangential component (F_t) of this force perpendicular to an outwardly oriented normal (n) on the surface at a contact point of a reference (11) fixed to the robot more strongly than a normal component (F_n) of the force in the direction of said surface normal.

(57) Zusammenfassung: Nach einem erfindungsgemäßen Verfahren zum Steuern eines Roboters (10) in Abhängigkeit von einer auf den Roboter aufgeprägten externen Kraft (F_{ex}), wird der Roboter in einem ersten Betriebsmodus in Abhängigkeit von einer Oberfläche (21) derart gesteuert (S50), dass er einer Tangentialkomponente (F_t) dieser Kraft senkrecht zu einer nach außen gerichteten Normalen (n) auf der Oberfläche in einem Kontaktpunkt einer roboterfesten Referenz (11) mit der Oberfläche stärker zu folgen versucht als einer Normalkomponente (F_n) der Kraft in Richtung dieser Oberflächennormale.



WO 2019/141706 A1

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

Veröffentlicht:

- *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

Verfahren und System zum Steuern eines Roboters

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und System zum Steuern eines Roboters in Abhängigkeit von einer auf den Roboter aufgeprägten externen Kraft sowie ein Computerprogrammprodukt zur Durchführung des Verfahrens.

- 5 Aus der US 9,308,645 B2 ist eine Admittanzregelung zum Steuern von Robotern bekannt. Dabei wird auf Basis einer auf einen Roboter aufgeprägten externen Kraft regelungstechnisch eine Soll-Bewegung ermittelt, die eine virtuelle Masse unter dieser externen Kraft ausführen würde, und die der Roboter auszuführen versucht. Mit anderen Worten verhält sich der Endeffektor des Roboters so wie die
10 virtuelle Masse.

Dies ermöglicht eine vorteilhafte Handführung des frei(beweglich)en Endeffektors durch einen Bediener, indem dieser auf den Roboter manuell die externe Kraft aufprägt.

- Kontaktiert der Endeffektor dabei jedoch eine Oberfläche, kann es, insbesondere
15 aufgrund von Regelungenauigkeiten und dergleichen, dazu kommen, dass der Endeffektor ungewollt von der Oberfläche abhebt.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, den Betrieb eines Roboters zu verbessern.

- Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1
20 gelöst. Ansprüche 12, 13 stellen ein System bzw. Computerprogrammprodukt zur Durchführung eines hier beschriebenen Verfahrens unter Schutz. Die Unteransprüche betreffen vorteilhafte Weiterbildungen.

- Nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung wird bei einem Verfahren zum Steuern eines Roboters in Abhängigkeit von einer auf den Roboter aufgeprägten,
25 insbesondere aktuellen, externen Kraft der Roboter in einem ersten Betriebsmodus, insbesondere fortlaufend, in Abhängigkeit von einer Oberfläche derart bzw. mit der Maßgabe gesteuert, dass er einer Tangentialkomponente der

Kraft senkrecht zur einer nach außen gerichteten Normalen auf der Oberfläche in einem, insbesondere aktuellen, Kontaktpunkt einer roboterfesten Referenz mit der Oberfläche stärker zu folgen versucht, insbesondere folgt, als einer Normalkomponente der Kraft in Richtung dieser Oberflächennormale,
5 insbesondere derart bzw. mit der Maßgabe, dass er der Normalkomponente der Kraft, wenigstens im Wesentlichen, nicht zu folgen versucht, insbesondere nicht folgt. Mit anderen Worten wird der Roboter in dem ersten Betriebsmodus gesteuert, (um) der Normalkomponente weniger (leicht) zu folgen als der Tangentialkomponente, in einer Ausführung gar nicht zu folgen.

10 Hierdurch kann in einer Ausführung ein unerwünschtes Abheben von einer kontaktierten Oberfläche reduziert, in einer Ausführung, wenigstens im Wesentlichen, vermieden werden.

Ein Steuern bzw. eine Steuerung kann in einer Ausführung ein Regeln bzw. eine Regelung umfassen, insbesondere sein. Eine Kraft kann in einer Ausführung auch
15 ein Drehmoment umfassen, insbesondere sein.

Der Roboter weist in einer Ausführung wenigstens drei, insbesondere wenigstens sechs, in einer Ausführung wenigstens sieben, Gelenke, insbesondere antreibbare bzw. angetriebene und/oder Drehgelenke, auf, in einer Ausführung also, insbesondere elektrische, Antriebe zum Verstellen der Gelenke.

20 Hierdurch kann der Roboter in einer Ausführung vorteilhaft, insbesondere flexibel und/oder präzise, eingesetzt werden.

Die roboterfeste Referenz ist in einer Ausführung ein distaler Endeffektor des Roboters. Die externe Kraft wird in einer Ausführung manuell durch einen Bediener auf den Roboter, in einer Ausführung auf seine roboterfeste Referenz,
25 aufgeprägt bzw. ausgeübt bzw. ist eine manuell durch einen Bediener aufgeprägte externe Kraft. In einer Ausführung ist die externe Kraft eine im Kontaktpunkt angreifende Kraft, sie kann beispielsweise durch eine Jacobimatrix in an sich bekannter Weise (virtuell) dorthin transformiert bzw. verschoben werden bzw. sein.

Hierdurch kann der Roboter in einer Ausführung vorteilhaft handgeführt werden, in einer Ausführung zum Teachen bzw. Vorgeben von anschließend automatisch abzufahrenden Bahnen oder dergleichen.

- 5 Eine nach außen gerichtete Normale auf einer Oberfläche in einem Kontaktpunkt („Oberflächennormale“) steht in einer Ausführung senkrecht auf einer Tangentialebene (a_n) der Oberfläche in dem Kontaktpunkt und ist von der Oberfläche weg bzw. zu der roboterfesten Referenz hin gerichtet, sie kann beispielsweise in an sich bekannter Weise differentialgeometrisch durch den
- 10 entsprechend orientierten Gradienten bzw. das entsprechend orientierte Kreuzprodukt zweier nicht kollinearere Tangentialvektoren (a_n) der Oberfläche in dem Kontaktpunkt bestimmt sein bzw. werden, die ihrerseits zum Beispiel in an sich bekannter Weise durch Differentiation bestimmt sein bzw. werden können. Ist beispielsweise eine Oberfläche bzw. ihre Kontur durch die Funktion $S(x, y, z) = 0$ mit den kartesischen Koordinaten x , y , und z beschrieben, zum Beispiel eine
- 15 Kugeloberfläche durch $x^2+y^2+z^2 = 0$, so ist die Oberflächennormale \mathbf{n} in einem Kontaktpunkt (x, y, z) durch $\mathbf{n} = [\partial S/\partial x, \partial S/\partial y, \partial S/\partial z]^T$ bestimmt, im Beispiel durch $[x, y, z]^T$. Mit anderen Worten folgt in einer Ausführung der Roboter im ersten Betriebsmodus einer Projektion der externen Kraft in die Tangentialebene (a_n) der Oberfläche in dem Kontaktpunkt stärker als einer Projektion der externen Kraft in
- 20 Richtung der nach außen gerichteten Oberflächennormale bzw. versucht dies bzw. wird hierzu (entsprechend) gesteuert, in einer Ausführung folgt er der Projektion der externen Kraft in Richtung der nach außen gerichteten Oberflächennormale im ersten Betriebsmodus, wenigstens im Wesentlichen, gar nicht bzw. versucht dies bzw. wird hierzu (entsprechend) gesteuert.
- 25 In einer Ausführung wird der Roboter in einem zweiten Betriebsmodus, insbesondere fortlaufend, derart bzw. mit der Maßgabe gesteuert, dass er der Normalkomponente der externen Kraft stärker zu folgen versucht, insbesondere folgt, als in dem ersten Betriebsmodus, insbesondere derart bzw. mit der Maßgabe, dass er der Kraft unabhängig von ihrer Richtung zu folgen versucht,
- 30 insbesondere folgt. Mit anderen Worten wird der Roboter in dem zweiten

Betriebsmodus gesteuert, (um) der externen Kraft richtungsunabhängig (leicht) zu folgen.

Hierdurch kann in einer Ausführung die roboterfeste Referenz in dem zweiten Betriebsmodus absichtlich von der Oberfläche wegbewegt und/oder vorteilhaft frei
5 im Raum bewegt werden.

In einer Ausführung wird in Abhängigkeit von der Normalkomponente der Kraft von dem ersten in den zweiten Betriebsmodus umgeschaltet, in einer Ausführung, falls ein Betrag der Normalkomponente einen vorgegebenen Schwellwert übersteigt.

Hierdurch kann in einer Ausführung ein Bediener den ersten Betriebsmodus
10 einfach beenden, insbesondere, um die roboterfeste Referenz von der Oberfläche wegzubewegen, indem er ausreichend stark von der Oberfläche weg zieht.

Zusätzlich oder alternativ kann auch in Abhängigkeit von einer Benutzereingabe von dem ersten in den zweiten Betriebsmodus umgeschaltet, werden, beispielsweise ein Bediener einen entsprechenden physischen oder Software-
15 Schalter betätigen oder dergleichen.

In einer Ausführung wird der Roboter in dem ersten Betriebsmodus derart bzw. mit der Maßgabe gesteuert, dass er mit der roboterfesten Referenz eine vorgegebene Kraft gegensinnig zur Oberflächennormale auf die Oberfläche aufzuprägen versucht, insbesondere aufprägt. Mit anderen Worten wird der Roboter in dem
20 ersten Betriebsmodus gesteuert, (um) eine vorgegebene Kraft gegensinnig zur Oberflächennormale auf die Oberfläche aufzuprägen.

Hierdurch kann in einer Ausführung die roboterfeste Referenz vorteilhaft steuerungstechnisch an der Oberfläche fixiert werden und/oder eine gewünschte Prozesskraft, beispielsweise zur Bearbeitung der Oberfläche, aufprägen.

25 In einer Ausführung wird in Abhängigkeit von einem ermittelten Abstand, insbesondere bei Unterschreiten eines vorgegebenen Mindestabstands, in einer

Ausführung bei Kontakt, zwischen der roboterfesten Referenz und der Oberfläche in den ersten Betriebsmodus umgeschaltet.

Hierdurch kann in einer Ausführung ein Bediener den ersten Betriebsmodus einfach initiieren, indem er die roboterfeste Referenz ausreichend nahe zu der
5 Oberfläche zieht.

Zusätzlich oder alternativ kann auch in Abhängigkeit von einer Benutzereingabe in den ersten Betriebsmodus umgeschaltet, werden, beispielsweise ein Bediener einen entsprechenden physischen oder Software-Schalter betätigen oder dergleichen.

10 In einer Ausführung wird die externe Kraft mithilfe eines Sensors an der roboterfesten Referenz ermittelt.

Hierdurch kann sie in einer Ausführung besonders präzise ermittelt werden.

Zusätzlich oder alternativ wird die externe Kraft in einer Ausführung mithilfe von Sensoren an Gelenken des Roboters ermittelt, insbesondere auf Basis eines
15 dynamischen Modells des Roboters.

Hierdurch kann in einer Ausführung ein zusätzlicher Sensor an der roboterfesten Referenz entfallen.

In einer Ausführung wird die Oberflächennormale in Abhängigkeit von einer, in einer Ausführung mithilfe einer Abtastung, eines Sichtsystems oder dergleichen,
20 ermittelten Kontur der Oberfläche ermittelt.

Hierdurch kann sie in einer Ausführung besonders präzise ermittelt werden.

Zusätzlich oder alternativ wird die Oberflächennormale in einer Ausführung in Abhängigkeit von einer, in einer Ausführung auf Basis von CAD-Daten oder dergleichen, vorgegebenen Kontur der Oberfläche ermittelt.

Hierdurch kann in einer Ausführung ein zeitlicher und/oder apparativer Aufwand zum Ermitteln der Kontur entfallen.

In einer Ausführung wird der Kontaktpunkt in Abhängigkeit von einer Erfassung einer Umgebung der roboterfesten Referenz, in einer Ausführung mithilfe einer
5 Abtastung, eines Sichtsystems oder dergleichen, ermittelt.

Hierdurch kann er in einer Ausführung besonders präzise ermittelt werden.

Zusätzlich oder alternativ wird in einer Ausführung der Kontaktpunkt in Abhängigkeit von erfassten Stellungen von Gelenken des Roboters, einer ermittelten oder vorgegebenen Kontur der roboterfesten Referenz und/oder einer
10 ermittelten oder vorgegebenen Kontur der Oberfläche ermittelt.

Hierdurch kann in einer Ausführung ein zeitlicher und/oder apparativer Aufwand zum Erfassen der Umgebung entfallen.

In einer Ausführung wird der Roboter in dem ersten und/oder zweiten Betriebsmodus mithilfe einer Admittanzregelung gesteuert, die Steuerwerte für
15 Antriebe des Roboters in Abhängigkeit von der ermittelten externen Kraft ermittelt.

Hierdurch kann der Roboter in einer Ausführung besonders vorteilhaft, insbesondere intuitiv, zuverlässig und/oder präzise, handgeführt werden.

In einer Ausführung wird in dem ersten Betriebsmodus die Normalkomponente der ermittelten externen Kraft in Richtung der Oberflächennormale rechentechnisch
20 reduziert, insbesondere ausgeblendet bzw. -filtert.

Dadurch kann das erfindungsgemäß schwächere bzw. Nicht-Folgen der Normalkomponente, insbesondere mithilfe einer Admittanzregelung, besonders vorteilhaft, insbesondere zuverlässig und/oder mit geringem Rechen(zeit)aufwand, realisiert werden.

Nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung ist ein System, insbesondere hard- und/oder software-, insbesondere programmtechnisch, zur Durchführung eines hier beschriebenen Verfahrens eingerichtet und/oder weist Mittel zum Steuern des Roboters in Abhängigkeit von einer auf den Roboter aufgeprägten externen Kraft in dem ersten Betriebsmodus in Abhängigkeit von einer Oberfläche derart, dass der Roboter einer Tangentialkomponente der Kraft senkrecht zur nach außen gerichteten Normalen auf der Oberfläche in einem Kontaktpunkt einer roboterfesten Referenz mit der Oberfläche stärker zu folgen versucht als einer Normalkomponente der Kraft in Richtung dieser Oberflächennormale, insbesondere der Normalkomponente der Kraft nicht zu folgen versucht, auf.

In einer Ausführung weist das System bzw. sein(e) Mittel auf:
Mittel zum Steuern des Roboters in einem zweiten Betriebsmodus derart, dass er der Normalkomponente der Kraft stärker zu folgen versucht als in dem ersten Betriebsmodus, insbesondere derart, dass er der externen Kraft unabhängig von ihrer Richtung zu folgen versucht;
Mittel zum Umschalten von dem ersten in den zweiten Betriebsmodus in Abhängigkeit von der Normalkomponente der Kraft;
Mittel zum Steuern des Roboters in dem ersten Betriebsmodus derart, dass er mit der roboterfesten Referenz eine vorgegebene Kraft gegensinnig zur Oberflächennormale auf die Oberfläche aufzuprägen versucht;
Mittel zum Umschalten in den ersten Betriebsmodus in Abhängigkeit von einem ermittelten Abstand, insbesondere Kontakt, zwischen der roboterfesten Referenz und der Oberfläche und/oder in Abhängigkeit von einer Benutzereingabe;
einen Sensor an der roboterfesten Referenz und/oder Sensoren an Gelenken des Roboters zum Ermitteln der externen Kraft;
Mittel zum Ermitteln der Oberflächennormale in Abhängigkeit von einer ermittelten oder vorgegebenen Kontur der Oberfläche;
Mittel zum Ermitteln des Kontaktpunkts in Abhängigkeit von erfassten Stellungen von Gelenken des Roboters, einer ermittelten oder vorgegebenen Kontur der roboterfesten Referenz und/oder Oberfläche und/oder einer Erfassung einer Umgebung der roboterfesten Referenz;

Mittel zum Steuern des Roboters in dem ersten und/oder zweiten Betriebsmodus mithilfe einer Admittanzregelung, die Steuerwerte für Antriebe des Roboters in Abhängigkeit von der ermittelten externen Kraft ermittelt; und/oder Mittel zum rechentechnischen Reduzieren, insbesondere Ausblenden, der

5 Normalkomponente in dem ersten Betriebsmodus.

Ein Mittel im Sinne der vorliegenden Erfindung kann hard- und/oder softwaretechnisch ausgebildet sein, insbesondere eine, vorzugsweise mit einem Speicher- und/oder Bussystem daten- bzw. signalverbundene, insbesondere digitale, Verarbeitungs-, insbesondere Mikroprozessoreinheit (CPU) und/oder ein

10 oder mehrere Programme oder Programmmodule aufweisen. Die CPU kann dazu ausgebildet sein, Befehle, die als ein in einem Speichersystem abgelegtes Programm implementiert sind, abzuarbeiten, Eingangssignale von einem Datenbus zu erfassen und/oder Ausgangssignale an einen Datenbus abzugeben. Ein Speichersystem kann ein oder mehrere, insbesondere verschiedene,

15 Speichermedien, insbesondere optische, magnetische, Festkörper- und/oder andere nicht-flüchtige Medien aufweisen. Das Programm kann derart beschaffen sein, dass es die hier beschriebenen Verfahren verkörpert bzw. auszuführen imstande ist, sodass die CPU die Schritte solcher Verfahren ausführen kann und damit insbesondere den Roboter steuern kann. Ein Computerprogrammprodukt

20 kann in einer Ausführung ein, insbesondere nicht-flüchtiges, Speichermedium zum Speichern eines Programms bzw. mit einem darauf gespeicherten Programm aufweisen, insbesondere sein, wobei ein Ausführen dieses Programms ein System bzw. eine Steuerung, insbesondere einen Computer, dazu veranlasst, ein hier beschriebenes Verfahren bzw. einen oder mehrere seiner Schritte

25 auszuführen.

In einer Ausführung werden ein oder mehrere, insbesondere alle, Schritte des Verfahrens vollständig oder teilweise automatisiert durchgeführt, insbesondere durch das System bzw. sein(e) Mittel.

In einer Ausführung weist das System den Roboter und/oder seine Steuerung auf.

Mit besonderem Vorteil kann das vorliegende Verfahren zum Teachen bzw. Vorgeben von Roboterbahnen, insbesondere mittels Handführen des Roboters, insbesondere der roboterfesten Referenz, verwendet werden. Entsprechend wird in einer Ausführung in dem ersten Betriebsmodus - wenigstens zeitweise – eine
5 Pose des Roboters, insbesondere der roboterfesten Referenz, abgespeichert und in einer Weiterbildung anschließend auf Basis der abgespeicherten Posen eine Roboterbahn vorgegeben.

Weitere Vorteile und Merkmale ergeben sich aus den Unteransprüchen und den Ausführungsbeispielen. Hierzu zeigt, teilweise schematisiert:

- 10 Fig. 1: ein System nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung; und
Fig. 2: ein Verfahren zum Steuern eines Roboters des Systems nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung.

Fig. 1 zeigt ein System nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung mit einem Roboter 10, der einen Endeffektor 11 aufweist, und einer Robotersteuerung
15 30.

Der Endeffektor 11 wird durch einen Bediener 40 auf einer Oberfläche 21 eines Werkstücks 20 handgeführt, beispielsweise zum Teachen einer Bearbeitungsbahn.

Hierzu wird in einem ersten Schritt S10 (vgl. Fig. 2) eines Verfahrens zum Steuern des Roboters 10 nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung mithilfe eines
20 Kraft-Momenten-Sensors 12 am Endeffektor 11 eine vom Bediener 40 manuell aufgeprägte externe Kraft F_{ex} ermittelt.

In einer Abwandlung kann die Robotersteuerung die externe Kraft auch mithilfe von Sensoren 12' an den Gelenken des Roboters ermitteln. Allgemein kann die externe Kraft F_{ex} in einer Ausführung durch Transformation der Differenz der an
25 den Gelenken mithilfe der Sensoren gemessenen Achsmomente τ_{msr} und der auf Basis eines, gegebenenfalls inversen, dynamischen Modells des Roboters berechneten, insbesondere kommandierten, Achsmomente $\tau_{c,md}$ mit der

(transponierten) Jacobimatrix \mathbf{J}^T des Endeffektors bzw. seiner Spitze ermittelt werden:

$$\mathbf{F}_{\text{ex}} = \mathbf{J}^T \cdot (\boldsymbol{\tau}_{\text{msr}} - \boldsymbol{\tau}_{(\text{c})\text{md}})$$

- 5 Dem liegt die Überlegung zugrunde, dass die Abweichung zwischen den modellbasierten und gemessenen Achsmomenten gerade aus der externen Kraft resultiert, so dass durch Transformation der entsprechenden Achsmomente in den Arbeitsraum des Roboter(endeffektor)s die externe Kraft ermittelt werden kann.

Die Kontur der Oberfläche 21 ist, beispielsweise aus CAD-Daten, bekannt oder wird durch eine Kamera 31 ermittelt.

- 10 In Schritt S10 prüft die Robotersteuerung 30, ob (bereits bzw. noch) ein erster Betriebsmodus ausgewählt ist, beispielsweise durch Betätigung eines entsprechenden Schalters durch den Bediener.

Ist dies nicht der Fall (S10: „N“), liegt ein zweiter Betriebsmodus vor und die Robotersteuerung bzw. das Verfahren fährt mit Schritt S40 fort.

- 15 In Schritt S40 führt sie eine Admittanzregelung durch, bei der sie in an sich bekannter Weise aus der externen Kraft \mathbf{F}_{ex} an der Spitze des Endeffektors 11 eine Soll-Geschwindigkeit \mathbf{v}_d ermittelt, beispielsweise durch Zeitintegration gemäß

$$\mathbf{v}_d = \int (\mathbf{F}_{\text{ex}}/m) dt$$

- 20 mit der virtuellen Masse m , und die Antriebe 13 des Roboters zur Realisierung dieser Soll-Geschwindigkeit \mathbf{v}_d ansteuert. In einer Abwandlung kann auch eine virtuelle Dämpfung vorgesehen sein.

- Falls der erste Betriebsmodus ausgewählt ist (S10: „Y“), ermittelt die Robotersteuerung 30 in einem Schritt S20 auf Basis der Stellung der Gelenke des Roboters und der Kontur der Oberfläche 21 eine nach außen gerichtete
25 Oberflächennormale \mathbf{n} ($|\mathbf{n}| = 1$) senkrecht zur Oberfläche 21 im Kontaktpunkt der

Spitze des Endeffektors 11 mit der Oberfläche 21 sowie die Normalkomponente F_n der dort angreifenden externen Kraft F_{ex} in Richtung dieser Oberflächennormale n gemäß

$$F_n = \{[(F_{ex} \cdot n) + |F_{ex} \cdot n|]/2\} \cdot n$$

- 5 und prüft, ob der Betrag $|F_n|$ dieser Normalkomponente F_n einen vorgegebenen Grenzwert übersteigt.

Ist dies der Fall (S20: „Y“), schaltet sie in den zweiten Betriebsmodus um und fährt mit dem oben erläuterten Schritt S40 fort.

- Andernfalls (S20: „N“), d.h. falls (weiterhin) der erste Betriebsmodus ausgewählt
10 ist bzw. vorliegt, blendet die Robotersteuerung in einem Schritt S30 die Normalkomponente rechentechnisch aus, indem sie sie von der externen Kraft F_{ex} subtrahiert:

$$F_{ex} \leftarrow (F_{ex} - F_n).$$

- Mit anderen Worten filtert die Robotersteuerung in Schritt S30 die
15 Normalkomponente F_n der externen Kraft F_{ex} in Richtung der Oberflächennormale n aus.

Anschließend führt sie in einem Schritt S50 mit dieser gefilterten externen Kraft analog zu Schritt S40 die Admittanzregelung durch, im Ausführungsbeispiel etwa gemäß

20 $v_d = \int (F_{ex}/m)dt$

Dann kehrt das Verfahren zu Schritt S10 zurück.

Dadurch folgt der Roboter 10 im ersten Betriebsmodus mit seinem Endeffektor 11 der Normalkomponente F_n der vom Bediener 40 manuell aufgeprägten externen Kraft F_{ex} nicht und somit einer Tangentialkomponente $F_t = F_{ex} - (F_{ex} \cdot n) \cdot n$

demgegenüber stärker bzw. versucht dies regelungstechnisch zu realisieren. Im zweiten Betriebsmodus hingegen folgt der Roboter 10 mit seinem Endeffektor 11 der externen Kraft \mathbf{F}_{ex} unabhängig von ihrer Richtung bzw. versucht dies regelungstechnisch zu realisieren.

- 5 Obwohl in der vorhergehenden Beschreibung exemplarische Ausführungen erläutert wurden, sei darauf hingewiesen, dass eine Vielzahl von Abwandlungen möglich ist.

So kann in einer Abwandlung in Schritt S50 anstelle der Normalkomponente \mathbf{F}_n in Richtung der Oberflächennormale auch die Komponente der externen Kraft \mathbf{F}_{ex} parallel zur Oberflächennormale, d.h. richtungssinnunabhängig ausgefiltert bzw. als gefilterte externe Kraft nur die vorstehend erläuterte Tangentialkomponente \mathbf{F}_t berücksichtigt werden. Zusätzlich oder alternativ kann regelungstechnisch auch noch eine vorgegebene Kraft f_{cmd} gegensinnig zur Oberflächennormale auf die Oberfläche aufgeprägt werden, beispielsweise, indem sie in Schritt S50 der gefilterten externen Kraft hinzuaddiert wird:

$$\mathbf{F}_{\text{ex}} \leftarrow (\mathbf{F}_{\text{ex}} - \mathbf{F}_n) - f_{\text{cmd}} \cdot \mathbf{n} \text{ bzw. } \mathbf{F}_{\text{ex}} \leftarrow \mathbf{F}_t - f_{\text{cmd}} \cdot \mathbf{n}$$

Außerdem sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den exemplarischen Ausführungen lediglich um Beispiele handelt, die den Schutzbereich, die Anwendungen und den Aufbau in keiner Weise einschränken sollen. Vielmehr wird dem Fachmann durch die vorausgehende Beschreibung ein Leitfaden für die Umsetzung von mindestens einer exemplarischen Ausführung gegeben, wobei diverse Änderungen, insbesondere in Hinblick auf die Funktion und Anordnung der beschriebenen Bestandteile, vorgenommen werden können, ohne den Schutzbereich zu verlassen, wie er sich aus den Ansprüchen und diesen äquivalenten Merkmalskombinationen ergibt.

Bezugszeichenliste

	10	Roboter
	11	Endeffektor (roboterfeste Referenz)
	12;	
5	12'	Sensor
	13	Antrieb
	20	Werkstück
	21	Oberfläche
	30	Robotersteuerung
10	31	Kamera
	40	Bediener
	F_{ex}	externe Kraft
	F_{n}	Normalkomponente
15	F_{t}	Tangentialkomponente
	n	Oberflächennormale

Patentansprüche

1. Verfahren zum Steuern eines Roboters (10) in Abhängigkeit von einer auf den Roboter aufgeprägten externen Kraft (F_{ex}), wobei der Roboter in einem ersten Betriebsmodus in Abhängigkeit von einer Oberfläche (21) derart gesteuert wird
5 (S50), dass er einer Tangentialkomponente (F_t) dieser Kraft senkrecht zu einer nach außen gerichteten Normalen (n) auf der Oberfläche in einem Kontaktpunkt einer roboterfesten Referenz (11) mit der Oberfläche stärker zu folgen versucht als einer Normalkomponente (F_n) der Kraft in Richtung dieser Oberflächennormale.
- 10 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Roboter in dem ersten Betriebsmodus derart gesteuert wird, dass er der Normalkomponente der Kraft nicht zu folgen versucht.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch
15 gekennzeichnet, dass der Roboter in einem zweiten Betriebsmodus derart gesteuert wird (S40), dass er der Normalkomponente der Kraft stärker zu folgen versucht als in dem ersten Betriebsmodus.
4. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet,
20 dass in Abhängigkeit von der Normalkomponente der Kraft von dem ersten in den zweiten Betriebsmodus umgeschaltet wird (S20) und/oder der Roboter in dem zweiten Betriebsmodus derart gesteuert wird, dass er der Kraft unabhängig von ihrer Richtung zu folgen versucht.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch
25 gekennzeichnet, dass der Roboter in dem ersten Betriebsmodus derart gesteuert wird, dass er mit der roboterfesten Referenz eine vorgegebene Kraft gegensinnig zur Oberflächennormale auf die Oberfläche aufzuprägen versucht.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in Abhängigkeit von einem ermittelten Abstand, insbesondere Kontakt, zwischen der roboterfesten Referenz und der

Oberfläche und/oder in Abhängigkeit von einer Benutzereingabe in den ersten Betriebsmodus umgeschaltet wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die externe Kraft mithilfe eines Sensors (12) an der roboterfesten Referenz und/oder Sensoren (12') an Gelenken des Roboters ermittelt wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberflächennormale in Abhängigkeit von einer ermittelten oder vorgegebenen Kontur der Oberfläche ermittelt wird.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Kontaktpunkt in Abhängigkeit von erfassten Stellungen von Gelenken des Roboters, einer ermittelten oder vorgegebenen Kontur der roboterfesten Referenz und/oder Oberfläche und/oder einer Erfassung einer Umgebung der roboterfesten Referenz ermittelt wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Roboter in dem ersten und/oder zweiten Betriebsmodus mithilfe einer Admittanzregelung gesteuert wird, die Steuerwerte für Antriebe (13) des Roboters in Abhängigkeit von der ermittelten externen Kraft ermittelt.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in dem ersten Betriebsmodus die Normalkomponente rechentechnisch reduziert, insbesondere ausgeblendet wird.
12. System, das zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche eingerichtet ist und/oder Mittel (30) aufweist zum Steuern eines Roboters (10) in Abhängigkeit von einer auf den Roboter aufgeprägten externen Kraft (F_{ex}) in einem ersten Betriebsmodus in Abhängigkeit von einer Oberfläche (21) derart, dass der Roboter einer Tangentialkomponente (F_t) der Kraft senkrecht zu einer nach außen

gerichteten Normalen (n) auf der Oberfläche in einem Kontaktpunkt einer roboterfesten Referenz (11) mit der Oberfläche stärker zu folgen versucht als einer Normalkomponente (F_n) der Kraft in Richtung dieser Oberflächennormale.

- 5 13. Computerprogrammprodukt mit einem Programmcode, der auf einem von einem Computer lesbaren Medium gespeichert ist, zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11.

Fig. 1

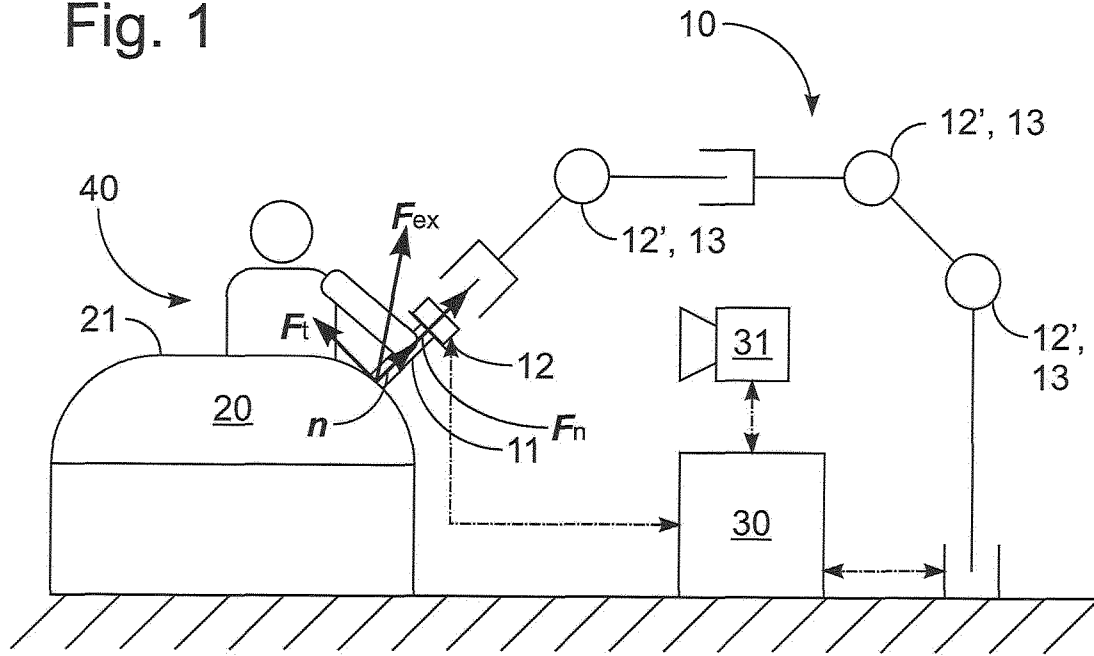
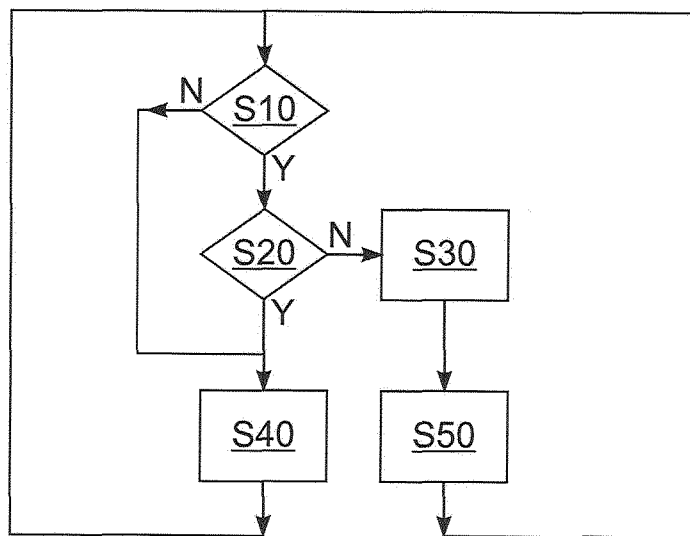


Fig. 2



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/051001

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>B25J 9/16</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B25J; G05B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 0331265 A2 (HITACHI CONSTRUCTION MACHINERY [JP]) 06 September 1989 (1989-09-06) figures 1,6,19,21,22,26 page 2 page 12 page 21 - page 22 page 9	1-13
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 18 April 2019		Date of mailing of the international search report 29 April 2019
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Antonopoulos, A Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2019/051001

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
EP 0331265 A2	06 September 1989	DE 68923889 D1	28 September 1995
		DE 68923889 T2	18 January 1996
		EP 0331265 A2	06 September 1989
		US 5129044 A	07 July 1992
.....			

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. B25J9/16
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 B25J G05B

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	EP 0 331 265 A2 (HITACHI CONSTRUCTION MACHINERY [JP]) 6. September 1989 (1989-09-06) Abbildungen 1,6,19,21,22,26 Seite 2 Seite 12 Seite 21 - Seite 22 Seite 9 -----	1-13

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

- * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
- "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
18. April 2019	29/04/2019

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Antonopoulos, A
--	--

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2019/051001

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung	
EP 0331265	A2	06-09-1989	DE 68923889 D1	28-09-1995
			DE 68923889 T2	18-01-1996
			EP 0331265 A2	06-09-1989
			US 5129044 A	07-07-1992
