



(10) **DE 10 2019 134 665 B3** 2020.12.10

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 134 665.7**
(22) Anmeldetag: **17.12.2019**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **10.12.2020**

(51) Int Cl.: **B25J 13/08 (2006.01)**
B25J 9/16 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
FRANKA EMIKA GmbH, 80797 München, DE

(74) Vertreter:
**RÖSLER · RASCH · van der HEIDE &
PARTNER PATENT- UND RECHTSANWÄLTE
Partnerschaftsgesellschaft mbB, 81241 München,
DE**

(72) Erfinder:
Spenninger, Andreas, 85757 Karlsfeld, DE

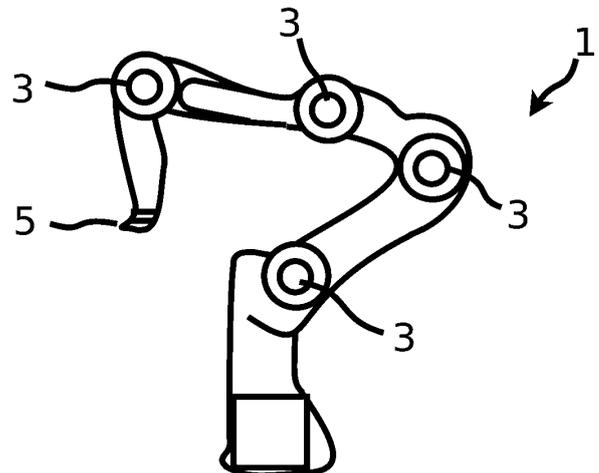
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2015 012 959	B4
DE	10 2015 205 176	B3
DE	10 2013 010 290	A1
DE	10 2013 019 450	A1
DE	10 2015 009 151	A1
DE	20 2019 102 430	U1

(54) Bezeichnung: **Kalibrieren eines virtuellen Kraftsensors eines Roboter manipulators**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren eines virtuellen Kraftsensors eines Roboter manipulators (1), wobei in einer Vielzahl von Posen die Schritte erfolgen:

- Aufbringen (S1) eines externen Kraftwinders auf den Roboter manipulator (1),
- Ermitteln (S2) einer Schätzung des externen Kraftwinders,
- Ermitteln (S3) einer jeweiligen Kostenfunktion auf Basis einer Differenz aus der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und dem vorgegebenen externen Kraftwinder,
- Ermitteln (S4) einer jeweiligen Kalibrierfunktion durch Minimieren der jeweiligen Kostenfunktion, und
- Abspeichern (S5) der jeweiligen Kalibrierfunktion in einen Datensatz aller Kalibrierfunktionen unter Zuordnung der jeweiligen Kalibrierfunktion zu der jeweiligen Pose, für die die jeweilige Kalibrierfunktion ermittelt wurde.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren eines virtuellen Kraftsensors eines Roboter-Manipulators sowie ein Robotersystem mit einem Roboterarm und mit einer Steuereinheit zum Anwenden dieser Kalibrierung.

[0002] Im Stand der Technik sind eine Vielzahl von Robotersystemen und entsprechende Verfahren zum Steuern der Robotersysteme bekannt.

[0003] Die DE 20 2019 102 430 U1 betrifft dazu ein Robotersystem aufweisend einen Roboter-Manipulator und eine mit dem Roboter-Manipulator verbundene Recheneinheit, wobei der Roboter-Manipulator eine Vielzahl von durch Gelenke miteinander verbundenen Gliedern aufweist und wobei ein jeweiliges der Gelenke einen Drehmomentsensor aufweist, wobei der jeweilige Drehmomentsensor zum Erfassen eines jeweiligen Moments zwischen den jeweiligen beiden am jeweiligen Gelenk anliegenden Gliedern des Roboter-Manipulators und zum Übermitteln des jeweiligen erfassten Moments an die Recheneinheit ausgeführt ist, wobei die Recheneinheit dazu ausgeführt ist: Einen Vektor aus den erfassten Momenten mit erwarteten Momenten zu einem Vektor aus externen Momenten zu kompensieren, eine vorgegebene Jacobimatrix zu faktorisieren und unterhalb eines vorgegebenen Invertierbarkeitsmaßes liegende Elemente aus zumindest einem der Faktoren zu identifizieren, die identifizierten Elemente des zumindest einen Faktors auf einen vorgegebenen Wert zu setzen zum Erzeugen von modifizierten Faktoren, aus den modifizierten Faktoren eine modifizierte Pseudoinverse einer Transponierten der Jacobimatrix zu ermitteln, den Vektor der externen Momente mittels der modifizierten Pseudoinversen in einen Vektor eines externen Kraftwinders zu transformieren, und ein Steuerprogramm auf Basis des externen Kraftwinders auszuführen und Aktuatoren des Roboter-Manipulators anhand des Steuerprogramms anzusteuern.

[0004] Die DE 10 2015 205 176 B3 betrifft ein Verfahren zum Steuern eines Manipulators, insbesondere eines Gelenkarmroboters, aufweisend: Erkennen eines Freigabewunsches basierend auf einer Kraftausübung auf den Manipulator durch eine Bedienerperson; und Freigeben des Manipulators in Reaktion auf das Erkennen des Freigabewunsches; wobei das Erkennen des Freigabewunsches ein Überwachen des Verlaufs zumindest eines einen Zustand des Manipulators charakterisierenden Messwerts umfasst; wobei der zumindest eine einen Zustand des Manipulators charakterisierende Messwert ein Drehmoment des Manipulators umfasst und/oder eine Position des Manipulators umfasst; wobei das Erkennen des Freigabewunsches ein Erkennen, dass eine Differenz zwischen einem gemessenen Drehmoment und einem Referenzdrehmoment bzw. zwischen ei-

ner gemessenen Position und einer Referenzposition eine vorgegebene Fehlerschranke betragsmäßig überschreitet umfasst; wobei das Referenzdrehmoment bzw. die Referenzposition durch einen Mittelwert von zuvor gemessenen Drehmomenten bzw. Positionen berechnet wird, oder wobei das Referenzdrehmoment bzw. die Referenzposition durch einen Snapshot-Messwert gebildet wird.

[0005] Die DE 10 2015 012 959 B4 betrifft ein Robotersystem mit zumindest einem Roboterarm, einer Steuereinheit zur Steuerung des Roboterarms und einer Roboterarm-Sensorik, wobei die Steuerung und Roboterarm-Sensorik so ausgelegt sind, dass sie auf vorherbestimmte, über Berührung durch einen Benutzer aufbringbare Kräfte und Momente, die auf den Roboterarm wirken, so reagieren, dass das Robotersystem mindestens eine vorherbestimmte Operation ausführt, die diesen Kräften und Momenten zugeordnet ist, wobei die Kräfte und Momente einer Steuerung auf der graphischen Benutzeroberfläche einer Anzeigevorrichtung des Robotersystems zugeordnet sind.

[0006] Die DE 10 2015 009 151 A1 betrifft ein Verfahren zum automatisierten Ermitteln eines Eingabebefehls für einen Roboter, der durch manuelles Ausüben einer externen Kraft auf den Roboter eingegeben wird, wobei der Eingabebefehl auf Basis desjenigen Anteils von durch die externe Kraft aufgeprägten Gelenkkraften ermittelt wird, der eine Bewegung des Roboters nur in einem für diesen Eingabebefehl spezifischen Unterraum des Gelenkkordinatenraums des Roboters zu bewirken sucht.

[0007] Die DE 10 2013 019 450 A1 betrifft ein Verfahren zum Vermeiden einer Kollision eines wenigstens zwei Bewegungsachsen aufweisenden Roboters mit einem vom Roboter unterschiedlichen Objekt, mit den Schritten: - Erfassen wenigstens eines eine auf den Roboter an einer ersten der Bewegungsachsen wirkende Kraft charakterisierenden ersten Werts mittels zumindest eines ersten Sensors, - Erfassen wenigstens eines eine auf den Roboter an der zweiten Bewegungsachse wirkende Kraft charakterisierenden zweiten Werts mittels zumindest eines zweiten Sensors, - Beziehen der Werte auf wenigstens einen in einem kartesischen Koordinatensystem liegenden Punkt, - Aufsummieren der auf den Punkt (P1 = bezogenen Werte, - Vermeiden der Kollision, wenn die Summe der aufsummierten Werte einen vorgebbaren Schwellenwert überschreitet.

[0008] Und die DE 10 2013 010 290 A1 betrifft ein Verfahren zum Überwachen eines kinematisch redundanten Roboters, mit den Schritten: Erfassen von Gelenkkraften, die in Gelenken des Roboters wirken; Ermitteln von einer externen Wirkkraft zwischen einer roboterfesten Referenz und einer Umgebung auf Basis der erfassten Gelenkkraften; Ermitteln von ei-

ner weiteren Überwachungsgröße, die wenigstens im Wesentlichen unabhängig von einer auf die roboterfeste Referenz wirkenden externen Kraft ist, auf Basis der erfassten Gelenkkräfte; und Überwachen der ermittelten externen Wirkkraft und der ermittelten weiteren Überwachungsgröße.

[0009] Aufgabe der Erfindung ist es, das Ausführen eines virtuellen Kraftsensors an einem Roboter manipulator bzw. Roboterarm zu verbessern.

[0010] Die Erfindung ergibt sich aus den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche. Vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0011] Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren eines virtuellen Kraftsensors eines Roboter manipulators, wobei der virtuelle Kraftsensor zum Ermitteln eines auf den Roboter manipulator wirkenden externen Kraftwinders auf Basis von durch Drehmomentsensoren in Gelenken des Roboter manipulators ermittelten Momenten dient, wobei der Roboter manipulator in eine Vielzahl von Posen verfahren oder manuell geführt wird und in jeder der Posen die folgenden Schritte ausgeführt werden:

- Aufbringen eines jeweiligen vorgegebenen externen Kraftwinders auf den Roboter manipulator,
- Ermitteln einer jeweiligen Schätzung des externen Kraftwinders auf Basis einer Invertierten oder Pseudoinvertierten der Transponierten der für die aktuelle Pose geltenden Jacobimatrix und auf Basis eines Vektors externer Drehmomente, wobei der Vektor externer Drehmomente auf Basis der durch die Drehmomentsensoren in den Gelenken des Roboter manipulators ermittelten Momente und auf Basis von auf den Roboter manipulator wirkenden erwarteten Momenten ermittelt wird,
- Ermitteln einer jeweiligen Kostenfunktion auf Basis einer Norm einer Differenz aus der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und dem vorgegebenen externen Kraftwinder oder auf Basis einer Differenz einer Norm der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und einer Norm des vorgegebenen externen Kraftwinders,
- Ermitteln einer jeweiligen Kalibrierfunktion durch Minimieren der jeweiligen Kostenfunktion, wobei die Kalibrierfunktion zum Anpassen eines im späteren Betrieb aktuell ermittelten externen Kraftwinders dient, und

- Abspeichern der jeweiligen Kalibrierfunktion in einen Datensatz aller Kalibrierfunktionen unter Zuordnung der jeweiligen Kalibrierfunktion zu der jeweiligen Pose, für die die jeweilige Kalibrierfunktion ermittelt wurde.

[0012] Eine Pose des Roboter manipulators gibt dabei insbesondere die Gesamtheit der Positionen und der Orientierungen aller Glieder einschließlich eines Endeffektors, sofern vorhanden, des Roboter manipulators an. Sind die vollständigen Informationen über eine Pose bekannt, kann der Roboter manipulator durch alle Antriebe insbesondere an seinen Gelenken in eine eindeutige „Haltung“ verfahren werden.

[0013] Ein externer Kraftwinder gibt Kräfte und/oder Momente an, die von der Umgebung ausgehend auf den Roboter manipulator und umgekehrt wirken, wobei der externe Kraftwinder im Allgemeinen drei Komponenten für Kräfte und drei Komponenten für Momente aufweist. Bevorzugt ist der vorgegebene externe Kraftwinder über alle Posen des Roboter manipulators der gleiche Kraftwinder, das heißt konstant. Alternativ bevorzugt ist für zumindest zwei der Posen ein unterschiedlicher Kraftwinder vorgesehen, was vorteilhaft auch solchen Posen Rechnung trägt, die bei einem konstanten Kraftwinder sich zumindest zum Teil singular verhalten würden, das heißt, dass in zumindest manchen der die Glieder verbindenden Gelenken des Roboter manipulators eine externe Kraft des Kraftwinders, ohne ein Moment im Gelenk zu erzeugen, linear durch dieses Gelenk in Richtung des nächstliegenden proximalen Gliedes geleitet wird. Ein Beispiel für eine solche singuläre Pose ist, wenn alle Glieder des Roboter manipulators auf einer gemeinsamen Geraden ausgerichtet sind und der externe Kraftwinder nur einen Kraftvektor in Richtung eben genau dieser gemeinsamen Geraden zur Basis des Roboter manipulators aufweist.

[0014] Während dieser externe Kraftwinder auf den Roboter manipulator aufgebracht wird, wird durch den virtuellen Kraftsensor eine Schätzung dieses externen Kraftwinders ermittelt. Dies erfolgt mithilfe von insbesondere, aber nicht notwendigerweise ausschließlich, an den Gelenken angeordnet Drehmomentsensoren. Die Drehmomentsensoren an den Gelenken sind aus der Vielzahl der im Stand der Technik bekannten Drehmomentsensoren auswählbar. Insbesondere sind die Drehmomentsensoren mechanische Drehmomentsensoren, in denen eine Dehnung eines flexibel elastischen Materials, beispielsweise in Speichen des jeweiligen Drehmomentsensors, erfasst wird, wobei durch Kenntnis der Materialkonstanten auf ein anliegendes Moment geschlossen werden kann. Weiterhin insbesondere möglich ist es, eine in einem elektrischen Motor vorliegende Stromstärke zu messen und von diesem auf ein im Gelenk vorliegendes Moment zu schließen. Das so erfasste jeweilige Moment in einem Gelenk setzt sich

typischerweise aus einer Vielzahl von Ursachen zusammen. Ein erster Teil des Moments ergibt sich im Falle einer Bewegung des Roboter manipulators aus den kinematischen Kräften und Momenten, insbesondere der Coriolisbeschleunigung sowie der Zentrifugalbeschleunigung. Ein weiterer Teil des gemessenen Moments ist, unabhängig von der Bewegung des Roboter manipulators, einem Schwerkrafteinfluss zuzurechnen.

[0015] Während an den Gelenken durch die Drehmomentsensoren die Momente insbesondere direkt oder indirekt durch eine Messung erfasst werden, so führen diese durch Schwerkrafteinfluss und kinematisch verursachten Kräfte und Momente zu den erwarteten Momenten. Das heißt, abhängig von der aktuellen Bewegungsgeschwindigkeit, von der aktuellen Beschleunigung des Roboter manipulators, und von der Masseverteilung und der aktuellen Pose des Roboter manipulators (Schwerkrafteinfluss) können diese Momente an den Drehmomentsensoren des Roboter manipulators der Theorie nach als erwartete Momente ermittelt werden und von den gemessenen Momenten an den jeweiligen Drehmomentsensoren abgezogen werden. Dies erfolgt bevorzugt in einem Impulsbeobachter, dessen Ergebnis die externen Momente sind.

[0016] Um von den so ermittelten externen Momenten auf eine Schätzung des vorgegebenen externen Kraftwinders mit seinem aktuellen Bezugspunkt zu schließen, ist die (Pseudo-)inverse der Transponierten der Jacobimatrix erforderlich. Die Pseudoinverse (anstelle der Inversen selbst) ist insbesondere dann erforderlich, wenn es sich bei dem Roboter manipulator um einen redundanten Manipulator handelt, das heißt, dass zumindest zwei der die Glieder verbindenden Gelenke zueinander redundante Freiheitsgrade aufweisen. In einem redundanten Roboter manipulator können insbesondere Glieder des Roboter manipulators bewegt werden, ohne dass sich eine Orientierung und/oder eine Position des Endeffektors des Roboter manipulators verändern würde.

[0017] Die Jacobimatrix verknüpft grundsätzlich die Winkelgeschwindigkeiten an den Gelenken zu der translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeit an einem beliebigen Punkt, insbesondere an einem distalen Ende des Roboter manipulators. Prinzipiell ist es jedoch unerheblich, ob tatsächlich Geschwindigkeiten betrachtet werden; so kann die Jacobimatrix auch für den Zusammenhang zwischen den Momenten an den Gelenken und den Kräften und Momenten an dem jeweiligen beliebigen Punkt verwendet werden. Die Transponierte der Jacobimatrix J , nämlich J^T , vermittelt zwischen dem externen Kraftwinder F_{ext} zu dem Vektor der ermittelten externen Drehmomente τ_{ext} wie folgt:

$$\tau_{ext} = J^T F_{ext}$$

[0018] Nach Umstellung dieser Gleichung mit Hilfe der (Pseudo)inversen der Transponierten von J , bezeichnet als $(J^T)^\#$, gilt für die Schätzung des externen Kraftwinders $F_{ext,est}$ auf Basis des Vektors der ermittelten externen Drehmomente τ_{ext} :

$$F_{ext,est} = (J^T)^\# \tau_{ext}$$

[0019] Die Richtung und der Betrag des vorgegebenen externen Kraftwinders sind per Definition bekannt, da der bekannte Betrag der Vorgabe der externen Kraftwinder auch aufgebracht wird. Mit obiger Rechnung ist auch die Schätzung des externen Kraftwinders in jeder einzelnen Pose des Roboter manipulators, in der ein externer Kraftwinder aufgebracht wird, bekannt. Hierauf erfolgt das Ermitteln einer jeweiligen Kostenfunktion auf Basis einer Norm einer Differenz aus der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und dem vorgegebenen externen Kraftwinder oder auf Basis einer Differenz einer Norm der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und einer Norm des vorgegebenen externen Kraftwinders.

[0020] Im ersten Fall, nämlich wenn das Ermitteln einer jeweiligen Kostenfunktion auf Basis einer Norm einer Differenz aus der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und dem vorgegebenen externen Kraftwinder erfolgt, wird eine Kostenfunktion K nach folgendem Schema ermittelt:

$$K = f(\|F_{ext,est} - F_{ext,real}\|)$$

[0021] Im zweiten Fall, nämlich wenn das Ermitteln einer jeweiligen Kostenfunktion auf Basis einer Differenz einer Norm der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und einer Norm des vorgegebenen externen Kraftwinders erfolgt, wird eine Kostenfunktion nach dem folgendem Schema ermittelt:

$$K = f(\|F_{ext,est}\| - \|F_{ext,real}\|)$$

[0022] Während der erste Fall für den allgemeinen Fall von mehreren Komponenten von Kräften und/oder Momenten im externen Kraftwinder bevorzugt verwendet wird, eignet sich der zweite Fall insbesondere für die Betrachtung einer einzelnen Komponente, insbesondere dann, wenn der vorgegebene externe Kraftwinder in die immer gleiche Richtung zeigt, was insbesondere beim Anhängen einer externen Last mit vorgegebener Masse der Fall ist.

[0023] Ferner folgt das Ermitteln einer jeweiligen Kalibrierfunktion durch Minimieren der jeweiligen Kostenfunktion, wobei die Kalibrierfunktion zum Anpassen eines im späteren Betrieb aktuell ermittelten externen Kraftwinders dient, das heißt, Ziel ist die Lösung der Vorschrift $\min K(x)$ nach den Variablen und/oder Parametern x der Kalibrierfunktion.

[0024] Bevorzugt erfolgen die Schritte des Ermitteln einer Schätzung des externen Kraftwinders, des Ermitteln einer jeweiligen Kalibrierfunktion durch Ermitteln einer jeweiligen Kostenfunktion und Minimieren dieser, und des Abspeicherns der jeweiligen Kalibrierfunktion jeweils durch eine Recheneinheit. Die Recheneinheit ist insbesondere mit dem Roboter manipulator verbunden. Besonders bevorzugt ist die Recheneinheit am Roboter manipulator selbst, insbesondere an einem Sockel oder einer Basis des Roboter manipulators, angeordnet.

[0025] Es ist eine vorteilhafte Wirkung der Erfindung, dass anstelle der Kalibrierung jedes einzelnen der Drehmomentsensoren des Roboter manipulators die Gesamtheit aller Drehmomentsensoren in ihrer Funktion als virtueller Kraftsensor unter Berücksichtigung der erwarteten Momente auf den Roboter manipulator posenabhängig kalibriert werden, und somit alle Unsicherheiten in der Masseverteilung des Roboter manipulators, Eigenheiten der Drehmomentsensoren und andere Effekte allesamt berücksichtigt werden. Durch den Datensatz aller Kalibrierfunktionen ist es somit möglich, eine für eine bestimmte Pose des Roboter manipulators individuelle Kalibrierung auf den virtuellen Kraftsensor des Roboter manipulators anzuwenden.

[0026] Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Aufbringen des vorgegebenen externen Kraftwinders auf den Roboter manipulator an einem distalen Ende des Roboter manipulators. Am distalen Ende des Roboter manipulators ist bevorzugt ein Endeffektor angeordnet. Da Kontaktkräfte des Roboter manipulators, abgesehen von unerwarteten Kollisionen, typischerweise zwischen dem Endeffektor und einem Objekt aus der Umgebung des Roboter manipulators stattfinden, berücksichtigt diese Ausführungsform vorteilhaft diesen Umstand, sodass die Kalibrierung insbesondere mit Bezug auf einen Kraftwinder zwischen dem Endeffektor am distalen Ende des Roboter manipulators und der Umgebung des Roboter manipulators erfolgt.

[0027] Bevorzugt wird die Vielzahl von Posen des Roboter manipulators durch ein äquidistantes Gitter von Positionen für einen Referenzpunkt des Roboter manipulators gegenüber einem erdfesten Koordinatensystem festgelegt, wodurch vorteilhaft sämtliche mögliche Positionen des Referenzpunktes des Roboter manipulators (unter Umständen mit mehreren Posen je Gitterpunkt für einen redundanten Roboterma-

nipulator) zumindest näherungsweise berücksichtigt werden, allerdings auch eine sehr hohe Anzahl von Gitterpunkten zu berücksichtigen ist.

[0028] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform wird daher eine Aufgabe für den Roboter manipulator vorgegeben, die Aufgabe analysiert, und abzufahrende Arbeitspunkte werden bei der Ausführung der Aufgabe identifiziert, wobei die jeweiligen Posen des Roboter manipulators so gewählt werden, dass jeweils einer der Arbeitspunkte und ein Referenzpunkt des Roboter manipulators in einer jeweiligen Pose übereinstimmen. Der Referenzpunkt des Roboter manipulators ist insbesondere ein Referenzpunkt an dem distalen Ende des Roboter manipulators, und insbesondere am Endeffektor gedacht angeordnet. Der Referenzpunkt ist insbesondere körperfest mit dem Roboter manipulator, insbesondere mit einem Ort auf der Oberfläche des Roboter manipulators gedacht verbunden, das heißt, er führt gegenüber diesem ausgewählten Ort keine Relativbewegung auch bei einer Bewegung des Roboter manipulators durch. Vorteilhaft wird mit dieser Ausführungsform die Kalibrierung speziell auf eine vom Roboter manipulator durchzuführende Aufgabe abgestimmt und die Zahl der Gitterpunkte deutlich reduziert.

[0029] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist der Roboter manipulator ein redundanter Roboter manipulator und die Schätzung des externen Kraftwinders wird unter Verwendung der Pseudoinversen der Transponierten der für die jeweilige Pose des Roboter manipulators aktuellen Jacobimatrix ermittelt. Ein redundanter Roboter manipulator weist zueinander redundante Freiheitsgrade auf. Das heißt insbesondere, dass sich Glieder des Roboter manipulators bewegen können, ohne dass sich dabei eine Orientierung eines bestimmten Gliedes, insbesondere eines Endeffektors des Roboter manipulators, und/oder eine Position eines vorgegebenen Referenzpunktes, insbesondere an dem distalen Ende des Roboter manipulators, ändert.

[0030] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform wird zumindest für eine Teilmenge der Vielzahl von Posen des Roboter manipulators der redundante Roboter manipulator in seinem Nullraum über eine Vielzahl von Posen verfahren und für jede der Vielzahl von Posen wird eine eigene Kalibrierfunktion ermittelt und abgespeichert. Vorteilhaft werden durch diese Ausführungsform auch sich ändernde Ungenauigkeiten bei der Schätzung eines externen Kraftwinders durch eine Posen-Änderung des Roboter manipulators in seinem Nullraum berücksichtigt.

[0031] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Minimieren der jeweiligen Kostenfunktion durch ein gradienbasiertes Verfahren.

Die Aufgabe der Minimierung der Kostenfunktion, das heißt $\min K(x)$, wird dabei insbesondere mit Hilfe eines Suchschrittes $s = -\alpha \nabla K$ ausgeführt, wobei α die Länge des aktuellen Suchschrittes, s die Suchrichtung, und ∇ den Gradienten der Kostenfunktion $K(x)$, abhängig von Variablen und/oder Parametern x der Kalibrierfunktion $K(x)$ angibt. Bevorzugt wird der Parameter α mithilfe eines Liniensuchverfahrens, dem sogenannten „line search“ bestimmt, sodass in dem unter Umständen höherdimensionalen Parameterraum von x nach Bestimmung der Suchrichtung entlang dieser Suchrichtung das lokale Minimum gesucht wird und bei Erreichen dieses lokalen Minimums eine neue Suchrichtung durch Ermittlung eines neuen aktuellen Gradienten der dort ermittelten Kostenfunktion (∇K) ermittelt wird. Alternativ bevorzugt wird das gradientenbasierte Suchverfahren um Krümmungsinformationen der Kostenfunktion erweitert und somit eine quadratische Optimierung verwendet. Vorteilhaft ist durch die Verwendung eines gradientenbasierten Verfahrens ein deterministischer Algorithmus mit ausreichend schneller Konvergenz in Richtung eines lokalen oder idealerweise globalen Optimums der Kostenfunktion zur Minimierung dieser gegeben.

[0032] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Minimieren der jeweiligen Kostenfunktion durch ein genetisches oder evolutorisches Verfahren. Genetische Algorithmen bzw. Evolutionsalgorithmen basieren insbesondere auf dem Zufallsprinzip, nach dem Startpunkte von x mehr oder weniger zufällig gewählt werden und/oder Werte von x mit Potential zur Konvergenz zu einem lokalen oder globalen Minimum rekombiniert werden. Während genetische und evolutionäre Algorithmen eine höhere Chance aufweisen, das globale Minimum (im Gegensatz zu einem lokalen Minimum) zu finden, kann deren Rechenzeit die gradientenbasierten Verfahren erheblich übersteigen.

[0033] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Aufbringen des vorgegebenen externen Kraftwinders am Roboterarm durch Anhängen einer Last mit vorgegebener Masse an den Roboterarm. Bei konstanter und bekannter Schwerkraft ist durch Anhängen einer Last mit vorgegebener Masse sehr zuverlässig sichergestellt, dass der externe Kraftwinder immer in die gleiche Richtung bezüglich eines erdfesten Koordinatensystems und in immer gleicher Stärke wirkt.

[0034] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Aufbringen des vorgegebenen externen Kraftwinders am Roboterarm durch Verbinden einer mechanischen Feder des Roboterarms mit einem Auflager so, dass die mechanische Feder vorgespannt ist und eine Kraft auf den Roboterarm ausübt. Das mechanische Auflager ist bevorzugt an einem zweiten Manipulator an-

geordnet, bevorzugt an einem Endeffektor des zweiten Manipulators. Vorteilhaft können durch die Verwendung einer Feder durch Dehnung der Feder über einen bestimmten linearen Bereich der Feder kontinuierlich beliebige Werte einer Kraftkomponente des externen Kraftwinders vorgegeben werden.

[0035] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Aufbringen des vorgegebenen externen Kraftwinders am Roboterarm durch Bewegen des Roboterarms, sodass vorgegebene Beschleunigungen am Roboterarm durch die träge Masse des Roboterarms auftreten. Gemäß dieser Ausführungsform werden bei den erwarteten Momenten die Momente aus der Bewegung des Roboterarms entsprechend nicht berücksichtigt, da genau diese Momente erfasst werden sollen und daraus eine Schätzung des externen Kraftwinders ermittelt wird. Vorteilhaft ist gemäß dieser Ausführungsform weder eine Last mit zusätzlicher Masse am Roboterarm noch das Verbinden mit einer Feder noch das Aufbringen sonstiger externer Kräfte und/oder Momente notwendig, da alleine die durch den Roboterarm selbst ausführbare Bewegung zum Kalibrieren des virtuellen Kraftsensors dient.

[0036] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Robotersystem mit einem Roboterarm und mit einer Steuereinheit, wobei die Steuereinheit dazu ausgeführt ist, einen virtuellen Kraftsensor am Roboterarm auszuführen, wobei der virtuelle Kraftsensor zum Ermitteln eines auf den Roboterarm wirkenden externen Kraftwinders dient und der externe Kraftwinder auf Basis von durch Momentensensoren in Gelenken des Roboterarms ermittelten Momenten und auf Basis von auf den Roboterarm wirkenden erwarteten Momenten und auf Basis der Invertierten oder Pseudoinvertierten der Transponierten der jeweils poseabhängigen aktuellen Jacobimatrix ermittelt wird, wobei die Steuereinheit dazu ausgeführt ist, auf den aktuell ermittelten externen Kraftwinder eine poseabhängige Kalibrierung anzuwenden, und die Kalibrierung aus dem nach einem Verfahren erzeugten Datensatz aller Kalibrierfunktionen durch Auswählen einer bestimmten der jeweiligen aktuellen Pose des Roboterarms zugeordneten Kalibrierfunktion oder durch Erzeugen einer Interpolation zumindest zwei der Kalibrierfunktionen zu erzeugen, wobei die jeweiligen Posen der zumindest zwei bestimmten der Kalibrierfunktionen der jeweiligen aktuellen Pose des Roboterarms am nächsten liegen.

[0037] Vorteile und bevorzugte Weiterbildungen des vorgeschlagenen Robotersystems ergeben sich durch eine analoge und sinngemäße Übertragung der im Zusammenhang mit dem vorgeschlagenen Verfahren vorstehend gemachten Ausführungen.

[0038] Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, in der - gegebenenfalls unter Bezug auf die Zeichnung - zumindest ein Ausführungsbeispiel im Einzelnen beschrieben ist. Gleiche, ähnliche und/oder funktionsgleiche Teile sind mit gleichen Bezugszeichen versehen.

[0039] Es zeigen:

Fig. 1 ein Verfahren zum Kalibrieren eines virtuellen Kraftsensors eines Roboter manipulators gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Fig. 2 einen Roboter manipulator, auf dem das Verfahren nach **Fig. 1** ausgeführt wird, und

Fig. 3 ein Robotersystem zum Verwenden des Ergebnisses der Kalibrierung nach **Fig. 1** gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung.

[0040] Die Darstellungen in den Figuren sind schematisch und nicht maßstäblich.

[0041] **Fig. 1** zeigt ein Verfahren zum Kalibrieren eines virtuellen Kraftsensors eines Roboter manipulators **1**. Der Roboter manipulator **1** wird in eine Vielzahl von Posen durch entsprechende Ansteuerung seiner Antriebe verfahren. Hierbei handelt es sich um einen redundanten Roboter manipulator **1**. Daher werden für eine gemeinsame Position des distalen Endes **5** des Roboter manipulators **1** eine Vielzahl von Posen des Roboter manipulators **1** eingenommen, indem der redundante Roboter manipulator **1** in seinem Nullraum über eine Vielzahl von Posen verfahren wird. In jeder der Posen wird der Roboter manipulator **1** für eine gewisse Zeitspanne bewegungsfrei gehalten, um die folgenden Schritte wiederholt, das heißt an jeder der Posen, auszuführen: Zunächst wird ein vorgegebener externer Kraftwinder mit vorgegebenen Kräften und Momenten auf das distale Ende **5** des Roboter manipulators **1** aufgebracht **S1**. Dies erfolgt durch eine externe Prüfeinheit (nicht in **Fig. 1** dargestellt). Daraufhin erfolgt das Ermitteln **S2** einer Schätzung des externen Kraftwinders $F_{ext,est}$ auf Basis einer Pseudoinversen der Transponierten der für die aktuelle Pose geltenden Jacobimatrix, das heißt $(J^T)^{\#}$ und auf Basis eines Vektors externer Drehmomente τ_{ext} , wobei der Vektor externer Drehmomente τ_{ext} auf Basis der durch die Drehmomentsensoren **3** in den Gelenken des Roboter manipulators **1** ermittelten Momente und auf Basis von auf den Roboter manipulator **1** wirkenden erwarteten Momenten ermittelt wird:

$$F_{ext,est} = (J^T)^{\#} \tau_{ext}$$

[0042] Die Pseudoinverse der Transponierten der für die aktuelle Pose geltenden Jacobimatrix, das heißt $(J^T)^{\#}$ statt $(J^T)^{-1}$, wird dabei verwendet, da es sich um einen redundanten Roboter manipulator **1** handelt. Hierauf erfolgt das Ermitteln **S3** einer jeweiligen Kostenfunktion auf Basis einer Norm einer Differenz aus der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und dem vorgegebenen externen Kraftwinder. Die Kostenfunktion wird für jede der Posen des Roboter manipulators **1** jeweils ermittelt als:

$$K = \|F_{ext,est} - F_{ext,real}\|_2^2$$

[0043] Das heißt, die Zweinorm der Differenz zwischen der Schätzung des externen Kraftwinders $F_{ext,est}$ und der a-priori bekannten Vorgabe des externen Kraftwinders $F_{ext,real}$ wird zum Quadrat genommen. Das skalare Ergebnis dieser Vorschrift entspricht der Kostenfunktion. Ferner folgt das Ermitteln **S4** einer jeweiligen Kalibrierfunktion durch Minimieren der jeweiligen Kostenfunktion durch ein gradientenbasiertes Verfahren. Die Aufgabe $\min K(x)$ wird dabei insbesondere mit Hilfe eines Suchschrittes $s = -\alpha \nabla K$ ausgeführt, wobei α die Länge des aktuellen Suchschrittes, s der Suchrichtung, und ∇ den Gradienten der Kostenfunktion $K(x)$, abhängig von Variablen und/oder Parametern x der Kalibrierfunktion $L(x)$ angibt. Bevorzugt wird der Parameter α mithilfe der eines Liniensuchverfahrens, dem sogenannten „line search“ bestimmt, sodass in dem unter Umständen höherdimensionalen Parameterraum von x nach Bestimmung der Suchrichtung entlang dieser Suchrichtung das lokale Minimum gesucht wird und bei Erreichen dieses lokalen Minimums seine neue Suchrichtung durch Ermittlung von Gradienten der Kostenfunktion (∇K) ermittelt. Damit steht im Ergebnis ein Variablensatz und/oder Parametersatz x_0 zur Verfügung, der, wenn mit seiner Hilfe die Schätzung des externen Kraftwinders $F_{ext,est}$ mit der Kalibrierfunktion $L(x_0)$ angepasst wird, zu einer minimalen Kostenfunktion $K(x_0)$ führt. Schließlich erfolgt das Abspeichern **S5** der jeweiligen für die jeweilige Pose des Roboter manipulators **1** gültigen Kalibrierfunktion in einen Datensatz aller Kalibrierfunktionen unter Zuordnung der jeweiligen Kalibrierfunktion zu der jeweiligen Pose, für die die jeweilige zweite Kalibrierfunktion ermittelt wurde. Ein solcher Roboter manipulator **1**, an dem dieses Verfahren ausgeführt wird, ist in der **Fig. 2** gezeigt. Die Bezugszeichen der **Fig. 2** gelten dabei auch für die obige Erklärung der **Fig. 1**.

[0044] **Fig. 2** zeigt einen solchen Roboter manipulator **1** mit seinen Komponenten, den Drehmomentsensoren **3** und seinem distalen Ende **5** des Roboter manipulators **1**. Die redundanten Freiheitsgrade des Roboter manipulators **1** sind dabei symbolisch durch eine Vielzahl von Gelenken mit zueinander parallelen Gelenksachsen symbolisiert. An diesem Roboter manipulator **1** wird das Verfahren wie unter **Fig. 1** be-

schrieben ausgeführt. Es wird dabei auf die Erläuterungen zur **Fig. 1** verwiesen.

[0045] Fig. 3 zeigt ein Robotersystem **10** mit einem Roboterarm **12** und mit einer Steuereinheit **14**. Das Robotersystem **10** ist dabei symbolisch mit einem anderen Roboterarm **12** in der **Fig. 3** dargestellt, als der Roboterarm **1** aus der **Fig. 1**. Dies verdeutlicht, dass die Kalibrierung gemäß den Erklärungen zur **Fig. 1** sowie zur **Fig. 2** auf ein weiteres Robotersystem **10** übertragen werden können, ohne dass an diesem selbst die Kalibrierung stattgefunden hat. Die Steuereinheit **14** des Robotersystems **10** ist dabei an einer Basis des Roboterarms **12** angeordnet und führt einen virtuellen Kraftsensor am Roboterarm **12** aus, wobei der virtuelle Kraftsensor zum Ermitteln eines aktuell auf den Roboterarm **12** wirkenden externen Kraftwinders dient, und der externe Kraftwinder auf Basis von durch Momentensensoren **13** in Gelenken des Roboterarms **12** ermittelten Momenten und auf Basis von auf den Roboterarm **12** wirkenden erwarteten Momenten und auf Basis der Inversen oder Pseudoinversen der Transponierten der jeweils poseabhängigen aktuellen Jacobimatrix ermittelt wird. Die Steuereinheit **14** wendet ferner auf den aktuell ermittelten externen Kraftwinder eine poseabhängige Kalibrierfunktion an, wobei die Kalibrierfunktion aus dem nach den Erläuterungen zur **Fig. 1** erzeugten Datensatz aller zweiter Kalibrierungsmatrizen durch Auswählen einer bestimmten, der jeweiligen aktuellen Pose des Roboterarms **12** zugeordneten, das heißt am nächsten liegenden, Kalibrierfunktion bestimmt wird.

Bezugszeichenliste

1	Roboterarm
3	Drehmomentsensoren
5	distales Ende des Roboterarm
10	Robotersystem
12	Roboterarm
13	Momentensensoren
14	Steuereinheit
S1	Aufbringen
S2	Ermitteln
S3	Ermitteln
S4	Ermitteln
S5	Abspeichern

Patentansprüche

1. Verfahren zum Kalibrieren eines virtuellen Kraftsensors eines Roboterarm (1), wobei der virtuelle Kraftsensor zum Ermitteln eines auf den Roboterarm (1) wirkenden externen Kraftwin-

ders auf Basis von durch Drehmomentsensoren (3) in Gelenken des Roboterarm (1) ermittelten Momenten dient, wobei der Roboterarm (1) in eine Vielzahl von Posen verfahren oder manuell geführt wird und in jeder der Posen die folgenden Schritte ausgeführt werden:

- Aufbringen (S1) eines jeweiligen vorgegebenen externen Kraftwinders auf den Roboterarm (1),
- Ermitteln (S2) einer jeweiligen Schätzung des externen Kraftwinders auf Basis einer Invertierten oder Pseudoinvertierten der Transponierten der für die aktuelle Pose geltenden Jacobimatrix und auf Basis eines Vektors externer Drehmomente, wobei der Vektor externer Drehmomente auf Basis der durch die Drehmomentsensoren (3) in den Gelenken des Roboterarm (1) ermittelten Momente und auf Basis von auf den Roboterarm (1) wirkenden erwarteten Momenten ermittelt wird,
- Ermitteln (S3) einer jeweiligen Kostenfunktion auf Basis einer Norm einer Differenz aus der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und dem vorgegebenen externen Kraftwinder oder auf Basis einer Differenz einer Norm der ermittelten Schätzung des externen Kraftwinders und einer Norm des vorgegebenen externen Kraftwinders,
- Ermitteln (S4) einer jeweiligen Kalibrierfunktion durch Minimieren der jeweiligen Kostenfunktion, wobei die Kalibrierfunktion zum Anpassen eines im späteren Betrieb aktuell ermittelten externen Kraftwinders dient, und
- Abspeichern (S5) der jeweiligen Kalibrierfunktion in einen Datensatz aller Kalibrierfunktionen unter Zuordnung der jeweiligen Kalibrierfunktion zu der jeweiligen Pose, für die die jeweilige Kalibrierfunktion ermittelt wurde.

2. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Aufgabe für den Roboterarm (1) vorgegeben wird, die Aufgabe analysiert wird, und abzufahrende Arbeitspunkte bei der Ausführung der Aufgabe identifiziert werden, wobei die jeweiligen Posen des Roboterarm (1) so gewählt werden, dass jeweils einer der Arbeitspunkte und ein Referenzpunkt des Roboterarm (1) in einer jeweiligen Pose übereinstimmen.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Roboterarm (1) ein redundanter Roboterarm ist und die Schätzung des externen Kraftwinders unter Verwendung der Pseudoinvertierten der Transponierten der für die jeweilige Pose des Roboterarm (1) aktuellen Jacobimatrix ermittelt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei zumindest für eine Teilmenge der Vielzahl von Posen des Roboterarm (1) der redundante Roboterarm (1) in seinem Nullraum über eine Vielzahl von Posen verfahren wird und für jede der Vielzahl von Posen

eine eigene Kalibrierfunktion ermittelt und abgespeichert wird.

der jeweiligen aktuellen Pose des Roboterarms (12) am nächsten liegen.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei das Minimieren der jeweiligen Kostenfunktion durch ein gradienenbasiertes Verfahren erfolgt.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei das Minimieren der jeweiligen Kostenfunktion durch ein genetisches oder evolutorisches Verfahren erfolgt.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Aufbringen des vorgegebenen externen Kraftwinders am Roboter manipulator (1) durch Anhängen einer Last mit vorgegebener Masse an den Roboter manipulator (1) erfolgt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Aufbringen des vorgegebenen externen Kraftwinders am Roboter manipulator (1) durch Verbinden einer mechanischen Feder des Roboter manipulators (1) mit einem Auflager so erfolgt, dass die mechanische Feder vorgespannt ist und eine Kraft auf den Roboter manipulator (1) ausübt.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Aufbringen des vorgegebenen externen Kraftwinders am Roboter manipulator (1) durch Bewegen des Roboter manipulators (1) erfolgt, sodass vorgegebene Beschleunigungen am Roboter manipulator (1) durch die träge Masse des Roboter manipulators (1) auftreten.

10. Robotersystem (10) mit einem Roboterarm (12) und mit einer Steuereinheit (14), wobei die Steuereinheit (14) dazu ausgeführt ist, einen virtuellen Kraftsensor am Roboterarm (12) auszuführen, wobei der virtuelle Kraftsensor zum Ermitteln eines auf den Roboter manipulator (1) wirkenden externen Kraftwinders dient und der externe Kraftwinder auf Basis von durch Momentensensoren (13) in Gelenken des Roboterarms (12) ermittelten Momenten und auf Basis von auf den Roboterarm (12) wirkenden erwarteten Momenten und auf Basis der Invertierten oder Pseudoinvertierten der Transponierten der jeweils posenabhängigen aktuellen Jacobimatrix ermittelt wird, wobei die Steuereinheit (14) dazu ausgeführt ist, auf den aktuell ermittelten externen Kraftwinder eine posenabhängige Kalibrierung anzuwenden, und die Kalibrierung aus dem nach einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9 erzeugten Datensatz aller Kalibrierfunktionen durch Auswählen einer bestimmten der jeweiligen aktuellen Pose des Roboterarms (12) zugeordneten Kalibrierfunktion oder durch Erzeugen einer Interpolation zumindest zwei der Kalibrierfunktionen zu erzeugen, wobei die jeweiligen Posen der zumindest zwei bestimmten der Kalibrierfunktionen

Anhängende Zeichnungen

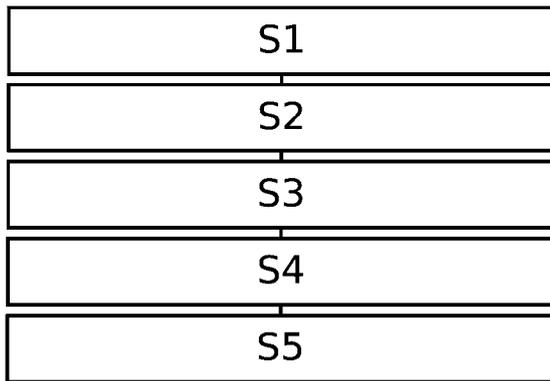


Fig. 1

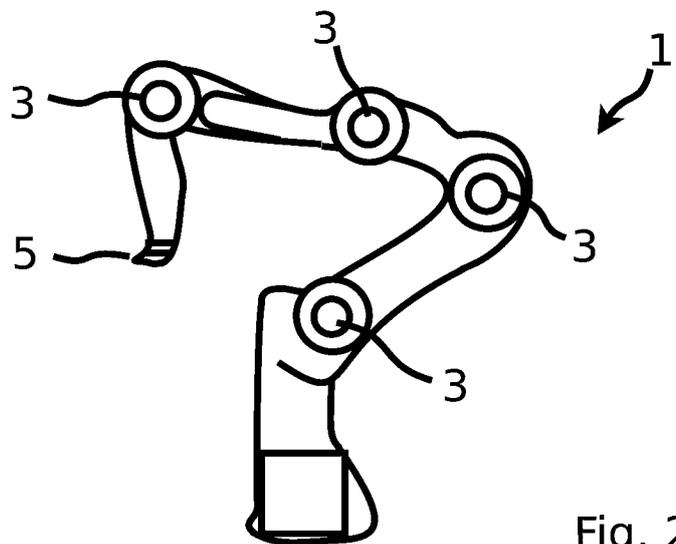


Fig. 2

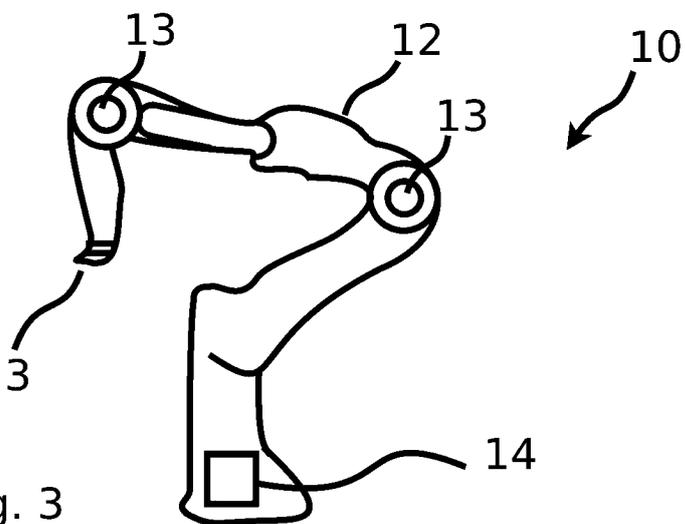


Fig. 3