



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 123 909.7**

(22) Anmeldetag: **09.12.2016**

(43) Offenlegungstag: **14.06.2018**

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

(71) Anmelder:

**ABB Schweiz AG, Baden, CH**

(74) Vertreter:

**Vogel, Albrecht, Dipl.-Ing. Dr.-Ing., 68526  
Ladenburg, DE**

(72) Erfinder:

**Wahrburg, Arne, 64293 Darmstadt, DE; Matthias,  
Björn, 76669 Bad Schönborn, DE; Dai, Fan, 64673  
Zwingenberg, DE; Ding, Hao, 69115 Heidelberg,  
DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

<b>DE</b>	<b>10 2006 061 752</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>10 2012 202 181</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>4 756 662</b>	<b>A</b>

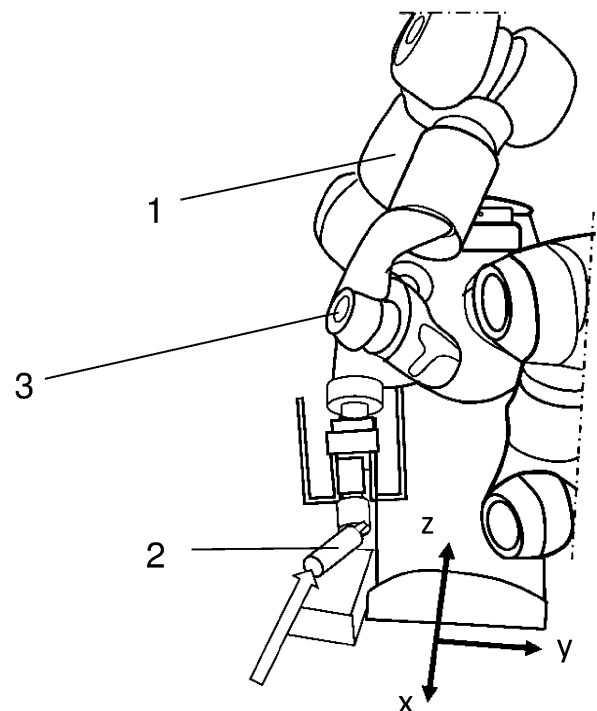
Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Minimierung von Belastungen der Gelenkverbindungen eines Manipulators**

(57) Zusammenfassung: Ein Verfahren zur Minimierung der Belastung mindestens einer Verbindung (3) eines Manipulators (1), der mittels eines Werkzeugs (2) auf ein Arbeitsobjekt oder seine Umgebung eine Kraft und/ oder ein Drehmoment ausüben soll, ist im Hinblick auf die Aufgabe, einen Manipulator so zu betreiben, dass dessen Manipulationsfähigkeit durch seinen individuellen konstruktiven Aufbau und seine individuelle Leistungsfähigkeit möglichst nicht störend beeinträchtigt wird, dadurch gekennzeichnet, dass die nachfolgenden Schritte ausgeführt werden:

- Festlegen des Betrags und/ oder der Richtung der Maximalkraft und/ oder des Maximaldrehmoments, mit welcher bzw. mit welchem die mindestens eine Gelenkverbindung maximal belastet werden soll,
- Vorgeben des Betrags und/ oder der Richtung der erwarteten Kraft und/ oder des erwarteten Drehmoments, welche bzw. welches das Werkzeug ausüben soll und/ oder auf dieses einwirkt,
- Vorgeben mindestens einer ersten räumlichen Orientierung und/ oder räumlichen Position des Werkzeugs, die sich während des Ausübens oder Einwirkens der Kraft und/ oder des Drehmoments nicht ändern soll, und
- Ermitteln einer Konfiguration der Gelenkverbindung, welche diese einnimmt, wenn das Werkzeug unter Einhaltung der vorgegebenen ersten räumlichen Orientierung und/ oder räumlichen Position die vorgegebene Kraft und/ oder das vorgegebene Drehmoment ausübt und/ oder erfährt derart, dass der festgelegte Betrag und/ oder die festgelegte Richtung der Maximalkraft ...



### Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Minimierung der Belastung mindestens einer Gelenkverbindung eines Manipulators, der mittels eines Werkzeugs auf ein Arbeitsobjekt oder seine Umgebung eine Kraft und/ oder ein Drehmoment ausübt oder ausüben soll. Die Erfindung betrifft weiter einen Manipulator, der mindestens eine bewegliche Gelenkverbindung und ein Werkzeug umfasst.

**[0002]** Industrielle Manipulatoren können unterschiedliche Gelenkverbindungen haben. Es gibt beispielsweise Drehgelenke. Dort ist der limitierende Faktor bei Manipulationsaufgaben oft das Drehmoment, das ein einzelnes Drehgelenk abgeben kann. Es gibt auch beispielsweise prismatische Gelenke, das sind Verschiebungsgelenke. Bei dieser Gelenkart ist der limitierende Faktor bei Manipulationsaufgaben oft die Kraft, die das Gelenk abstützen muss. Es gibt Manipulatoren, die ausschließlich Drehgelenke haben, und solche, die ausschließlich prismatische Gelenke haben, und solche, die sowohl Dreh- als auch prismatische Gelenke haben.

**[0003]** Drehmomente, die von Drehgelenkverbindungen eines Manipulators, insbesondere eines Roboterarmes oder Roboterarms, geleistet werden können, begrenzen oft dessen Manipulationsfähigkeit.

**[0004]** Besonders bei leichtgewichtigen Robotern und Manipulatoren für geringe Nutzlasten, beispielsweise bei einem Manipulator des Typs „YuMi“ (Marke), begrenzen geringe Maximaldrehmomente der Gelenkverbindungen die erzielbaren Kräfte, insbesondere die Kontaktkräfte, und/ oder Drehmomente, die ein Roboter oder ein Roboterarm auf die Umgebung, insbesondere ein Arbeitsobjekt, ausüben kann.

**[0005]** Wenn ein Roboter oder Roboterarm dieser Art zur Fertigung oder in einer Anordnung verwendet wird, können Überlastungsfehler von Gelenkverbindungen als Fehler auftreten. Diese Fehler beenden typischerweise eine Operation und führen zum Verlust von Produktivität. Eine weitere wichtige Anwendung ist das Anheben von Gegenständen, bei welcher Drehmomente einer Gelenkverbindung häufig ebenfalls limitierende Faktoren darstellen.

**[0006]** Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, einen Manipulator so zu betreiben, dass dessen Manipulationsfähigkeit durch seinen individuellen konstruktiven Aufbau und seine individuelle Leistungsfähigkeit möglichst nicht störend beeinträchtigt wird. Weiter ist es die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, die Belastung in einer Gelenkverbindungen bei einer gegebenen äußeren Belastung am Werkzeug zu minimieren, also die Drehmomentbelastung in einem Drehgelenk oder die Kraftbelastung in einem Verschiebungsgelenk.

**[0007]** Erfindungsgemäß wird die voranstehende Aufgabe durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst.

**[0008]** Danach ist das eingangs genannte Verfahren dadurch gekennzeichnet, dass die nachfolgenden Schritte ausgeführt werden:

- Festlegen des Betrags und/ oder der Richtung der Maximalkraft und/ oder des Maximaldrehmoments, mit welcher bzw. mit welchem die mindestens eine Gelenkverbindung maximal belastet werden soll,
- Vorgeben des Betrags und/ oder der Richtung der erwarteten Kraft und/ oder des erwarteten Drehmoments, welche bzw. welches das Werkzeug ausüben soll und/ oder auf dieses einwirkt,
- Vorgeben mindestens einer ersten räumlichen Orientierung und/ oder räumlichen Position des Werkzeugs, die sich während des Ausübens oder Einwirkens der Kraft und/ oder des Drehmoments nicht ändern soll, und
- Ermitteln einer Konfiguration der Gelenkverbindung, welche diese einnimmt, wenn das Werkzeug unter Einhaltung der vorgegebenen ersten räumlichen Orientierung und/ oder räumlichen Position die vorgegebene Kraft und/ oder das vorgegebene Drehmoment ausübt und/ oder erfährt derart, dass der festgelegte Betrag und/ oder die festgelegte Richtung der Maximalkraft und/ oder des Maximaldrehmoments, mit welcher bzw. mit welchem die mindestens eine Gelenkverbindung maximal belastet werden soll, nicht überschritten wird.

**[0009]** Unter einer Konfiguration der Gelenkverbindung soll hier die räumliche Orientierung und räumliche Position der Gelenkverbindung verstanden werden.

**[0010]** Erfindungsgemäß ist erkannt worden, dass eine Konfiguration der Gelenkverbindungen eines Manipulators optimiert werden kann, um die Belastung der Gelenkverbindungen durch Kräfte und/oder Drehmomente

zu reduzieren, wenn Kräfte und Drehmomente, insbesondere Kontaktkräfte, und Kontaktdrehmomente auftreten.

**[0011]** Erfindungsgemäß wird eine neue Art der Bedienung eines Manipulators vorgeschlagen.

**[0012]** Diese neue Art erlaubt das Reduzieren ausgewählter Drehmomentbelastungen einer Verbindung, insbesondere einer Gelenkverbindung, bevorzugt bei einer erwarteten statischen externen Belastung. Als Reaktion hierauf werden die Kräfte und Drehmomente, die ein Manipulator auf seine Umgebung in spezifischen kartesischen Richtungen ausüben kann, basierend auf gegebenen Maximaldrehmomenten von Gelenkverbindungen maximiert.

**[0013]** Aus anwendungstechnischer Sicht ist meistens das Minimieren von Belastungen an Gelenkverbindungen das Ziel. Das hier beschriebene Verfahren ist jedoch nicht auf Gelenkverbindungen beschränkt. Es erlaubt das Minimieren von Belastungen an beliebig ausgewählten Verbindungen, insbesondere beweglichen Verbindungen, eines Manipulators.

**[0014]** Vorteilhaft werden die Schritte des Verfahrens ausgeführt, um die räumlichen Orientierungen und räumlichen Positionen von mehreren Verbindungen relativ zueinander zu ermitteln. So kann die bestmögliche Konfiguration, nämlich räumliche Anordnung, von Verbindungen, insbesondere von Gelenkverbindungen, hergestellt werden, um optimal Kräfte und/ oder Drehmomente durch ein Werkzeug ausüben zu können.

**[0015]** Das Verfahren ist bei redundant und nicht redundant arbeitenden Manipulatoren anwendbar.

**[0016]** Bei redundant arbeitenden Manipulatoren kann die Konfiguration der Verbindungen, insbesondere der Gelenkverbindungen, optimiert werden, während eine konstante TCP-Stellung (Orientierung und Position) gegeben ist.

**[0017]** TCP steht für „Tool Center Point“, diese Begriffskombination beschreibt in deutscher Sprache einen Referenzpunkt eines montierten Werkzeugs.

**[0018]** Üblicherweise ist dieser Referenzpunkt der Ursprung eines kartesischen Koordinatensystems. Die TCP-Stellung beschreibt die mögliche räumliche Orientierung und räumliche Position eines Werkzeugs.

**[0019]** Vor diesem Hintergrund werden weiter vorteilhaft mehrere räumliche Orientierungen und/ oder räumliche Positionen des Werkzeugs vorgegeben, die während des Ausübens und/ oder Einwirkens einer Kraft und/ oder eines Drehmoments zugelassen werden sollen. Hierdurch kann berücksichtigt werden, dass das Werkzeug, wenn es längs einer Achse eine Kraft ausüben soll, durchaus um diese Achse verdreht werden kann. Es können so Freiheitsgrade bei der Ausrichtung des Werkzeugs genutzt werden, um die optimale Konfiguration, nämlich räumliche Anordnung der Verbindungen, zu erhalten.

**[0020]** Bei einem nicht redundant arbeitenden Manipulator kann das Verfahren auch angewendet werden, wenn sich eine oder mehrere Komponenten der TCP-Stellung verändern können.

**[0021]** Das Verfahren realisiert eine neue Art der Nutzung einer Redundanz. Bei Manipulatoren mit sieben oder mehr Freiheitsgraden kann eine unbegrenzte Anzahl von Konfigurationen der Verbindungen, insbesondere der Gelenkverbindungen, existieren, welche in der gleichen TCP-Stellung resultieren.

**[0022]** Das hier beschriebene Verfahren löst die Redundanz auf, indem eine Konfiguration der Verbindungen ausgewählt wird, die zu einer minimierten Belastung ausgewählter Verbindungen bei einer gegebenen statischen externen Last führt. Es können beispielsweise konkrete Gelenkverbindungen ausgewählt werden.

**[0023]** Des Weiteren wird der Grad der Redundanz erhöht, wenn die TCP-Stellung nicht vollständig spezifiziert ist, beispielsweise dann, wenn nur bestimmte kartesische Übersetzungen oder Orientierungen festgelegt sind. In einer solchen Situation kann auch ein traditioneller Manipulator mit sechs Freiheitsgraden hinsichtlich der festgelegten Komponenten der TCP-Stellung zu einem redundant arbeitenden werden.

**[0024]** Es wird automatisch die bestmögliche Konfiguration der Verbindungen, insbesondere der Gelenkverbindungen, berechnet, um die Manipulationsfähigkeit eines gegebenen Manipulators, insbesondere eines Roboters oder eines Roboterarms, zu maximieren bzw. zu optimieren.

**[0025]** Akademische Ergebnisse im Bereich der Online-Redundanzauflösung zur Minimierung von Belastungen von Gelenkverbindungen sind bereits bekannt. Beispielhaft hierfür seien die Dokumente [1] bis [4] am Ende der Figurenbeschreibung genannt. Jedoch zielen diese Lösungsvorschläge auf eine dynamische Redundanzauflösung während der Laufzeit ab und erfordern das direkte Kontrollieren eines Drehmoments.

**[0026]** Vorteilhaft werden die Schritte des Verfahrens an einer Vorrichtung, insbesondere einem Computer, ausgeführt, die vom Manipulator unabhängig betreibbar ist. Bei dem hier beschriebenen, besonders einfachen Verfahren wird auf eine Minimierung der statischen Drehmomente abgestellt, die vollständig offline durchgeführt werden kann und zu einer optimierten Konfigurierung der Verbindungen, insbesondere der Gelenkverbindungen, vordem Hintergrund einer gegebenen Aufgabe resultiert.

**[0027]** „Offline“ bedeutet im Gegensatz zu „online“, dass ein Programm an einem Computer entwickelt werden kann, der vom Manipulator unabhängig ist. Während der Entwicklung kann deshalb der Manipulator weiter betrieben werden, sodass Stillstandzeiten des Manipulators vermieden werden. Hierdurch kann ein Robotersystem mit verbesserter Manipulationsfähigkeit bereitgestellt werden.

**[0028]** Es ist insbesondere eine Erhöhung der maximalen Kraft und/ oder eines Drehmoments eines Manipulators ermöglicht, welche auf die Umgebung ausgeübt werden kann bzw. können, wobei gleichbleibende Maximaldrehmomente der Gelenkverbindungen gegeben sind. Dies ist insbesondere bei Manipulatoren mit relativ kleinen Drehmomenten der Gelenkverbindungen wichtig, wie beispielsweise bei einem Manipulator des Typs YuMi (Marke).

**[0029]** Bei Aufgaben in der Fertigung kann das Erhöhen der Kontaktkräfte und Drehmomente, die auf die Umgebung ausgeübt werden, von großem Vorteil sein. Des Weiteren ist das hier beschriebene Verfahren vorteilhaft, um Drehmomente von Gelenkverbindungen bei Hebeaufgaben zu minimieren.

**[0030]** Es ist eine vereinfachte Verwendung von Manipulatoren angegeben, die einen nicht vernachlässigbaren Umgebungskontakt haben. Der Benutzer muss eine Konfiguration nicht manuell auffinden, um die Belastungen von Verbindungen, insbesondere Gelenkverbindungen, zu minimieren. Der Benutzer ist vielmehr von dieser Aufgabe befreit. Es ist denkbar, eine Software zu einem Manipulator anzubieten, welche das beschriebene Verfahren ausführt.

**[0031]** Vorteilhaft können beim Ermitteln der räumlichen Orientierung und räumlichen Position der Verbindung geometrische oder räumliche Beschränkungen berücksichtigt werden. Beispielsweise können Winkel oder Strecken vorgegeben werden, die Bauteile des Manipulators nicht überschreiten dürfen. Hierdurch können Überlastungen oder zu steife Konfigurierungen vermieden werden.

**[0032]** Bevorzugt wird als Verbindung eine Gelenkverbindung verwendet. Gelenkverbindungen sind besonders häufig Belastungen unterworfen.

**[0033]** Weiter bevorzugt wird als Manipulator ein Roboterarm mit mehreren Verbindungen verwendet, wobei die Verbindungen als Gelenkverbindungen ausgestaltet sind, an denen Segmente des Roboterarms relativ zueinander beweglich angebunden sind. Ein Roboterarm muss besonders beweglich und kraftoptimiert arbeiten können.

**[0034]** Vorteilhaft wird mindestens eine Verbindung aus mehreren Verbindungen ausgewählt, deren Belastung minimiert werden soll. So können manche Verbindungen, die besonders empfindlich sind, bevorzugt geschont werden.

**[0035]** Weiter vorteilhaft wird mindestens eine Verbindung aus mehreren Verbindungen besonders gewichtet, wenn das Ermitteln der räumlichen Orientierung und räumlichen Position der Verbindung durchgeführt wird. Hierdurch können einzelne Verbindungen, die besonders beeinträchtigt werden oder in ihrem maximalen Drehmoment stark eingeschränkt sind, bevorzugt behandelt werden

**[0036]** Ein erfindungsgemäßer Manipulator, der die Aufgabe auch löst, umfasst mindestens eine bewegliche Verbindung und ein Werkzeug, wobei die räumliche Anordnung der Verbindung durch das hier beschriebene Verfahren ermittelt bzw. bestimmt ist. Bevorzugt sind alle Verbindungen optimiert konfiguriert.

**[0037]** In der Zeichnung zeigen

**Fig. 1** eine anfängliche Konfiguration der Gelenkverbindungen eines Manipulators gemäß einer ersten Ausführungsform, nämlich eines Roboterarms mit einem Werkzeug,

**Fig. 2** die schlechteste Konfiguration der Gelenkverbindungen des Roboterarms gemäß **Fig. 1**,

**Fig. 3** die beste Konfiguration der Gelenkverbindungen des Roboterarms gemäß **Fig. 1**,

**Fig. 4** die anfängliche Konfiguration der Gelenkverbindungen des Roboterarms mit einem Werkzeug,

**Fig. 5** die beste Konfiguration der Gelenkverbindungen des Roboterarms gemäß **Fig. 4**, wenn eine Rotation des Werkzeugs um die x-Achse möglich ist, und

**Fig. 6** die beste Konfiguration der Gelenkverbindungen des Roboterarms gemäß **Fig. 4**, wenn eine Translationsbewegung des Werkzeugs längs der y-Achse und der z-Achse möglich ist.

**Fig. 7** schematisch und beispielhaft einen Manipulator in einer zweiten Ausführungsform,

**Fig. 8** schematisch und beispielhaft einen Manipulator in einer dritten Ausführungsform.

**[0038]** Das Verfahren basiert auf einem ein Eingabe-Ausgabe-Diagramm:

**[0039]** Die beabsichtigte Funktion zur Minimierung von Belastungen von Verbindungen bei einem Robotersystem akzeptiert die folgenden Eingaben eines Benutzers:

Eingabe 1:

**[0040]** Eine gewünschte TCP-Stellung, die wie folgt beschrieben wird:

$$x_{TCP} \in \mathfrak{R}^6$$

Eingabe 2:

**[0041]** Eine Beschreibung dahingehend, welche Komponenten der TCP-Stellung fixiert sein sollen. Dies wird in einer diagonalen Matrix wie folgt kodiert:

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{tx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Psi_{ty} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Psi_{tz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Psi_{rx} & 0 & 0 \\ \rho & 0 & 0 & 0 & \Psi_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{rz} \end{bmatrix}, \Psi_i \in \{0, 1\}.$$

**[0042]** Wenn  $\Psi_i=1$ , ist die korrespondierende kartesische Richtung festgelegt.

**[0043]** Wenn  $\Psi_i=0$ , kann die korrespondierende Richtung modifiziert werden, um Belastungen von Verbindungen, insbesondere Gelenkverbindungen, zu reduzieren.

Eingabe 3:

**[0044]** Die erwartete kartesische Kraft- bzw. Momentenbelastung, die durch einen sechsdimensionalen Vektor beschrieben wird, der aus den vorhergesehenen Kontaktkräften und Drehmomenten bei der TCP-Stellung besteht. Dies wird wie folgt bezeichnet:

$$f_{ext} \in \mathfrak{R}^6$$

**[0045]** Optional kann eingegeben werden:

**[0046]** Die Beschreibung von Punkten, die zur Minimierung der Belastung von Verbindungen berücksichtigt werden sollen. Dies wird in der nachfolgenden diagonalen Matrix kodiert:

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N), \lambda_i \geq 0 \forall i = 1, \dots, N.$$

**[0047]** Dabei ist N die Zahl der Freiheitsgrade und  $\lambda_i$  spezifiziert, wie stark eine individuelle Verbindung gewichtet wird.

**[0048]** Durch eine Standardeinstellung kann die wichtende Matrix in folgender Weise vorgeschlagen werden:

$$\Lambda = \text{diag}(0,0,0,1,1,1,0)$$

**[0049]** Hierbei werden alle Gelenkverbindungen gleich gewichtet.

**[0050]** Die erwartete kartesische Kraft- bzw. Momentenbelastung  $f_{\text{ext}}$  muss nicht in exakter Weise spezifiziert werden. Es ist ausreichend, die Richtung des Vektors anzugeben. Bei einfachen Einsteck- oder Hebeaufgaben weist die erwartete Verschiebung typischerweise nur eine Komponente auf, die nicht null ist, nämlich die Kraft in der Richtung der Bewegung.

**[0051]** Die ausgegebene Funktion umfasst eine Konfiguration der Verbindungen, welche die spezifizierten Beschränkungen der TCP-Stellung berücksichtigt und die Belastungen der Verbindungen gemäß der spezifizierten Gewichtung bei der vorgegebenen kartesischen Verschiebung minimiert.

**[0052]** Um die optimierte Stellung zu berechnen, wird das folgende Optimierungsproblem gelöst:

$$\underset{q \in (\mathcal{N}^* \cap \mathcal{A})}{\text{minimize}} \sqrt{\left( J(q)^T f_{\text{ext}} + G(q) \right)^T \cdot \Lambda \cdot \left( J(q)^T f_{\text{ext}} + G(q) \right)} \quad (1)$$

**[0053]** Hierbei wird das gewichtete quadratische Mittel der Belastung der Verbindung minimiert, welches aus der externen Belastung  $f_{\text{ext}}$  und der Schwerkraft resultiert.

**[0054]** Der Satz  $\mathcal{N}^*$  bezeichnet den Nullraum mit Bezug auf die gegebene TCP-Stellung  $x_{TCP}$  und die spezifizierten festgelegten Richtungen, die in  $\Psi$  kodiert sind.

**[0055]** Wenn  $x=\phi(q)$  genutzt wird, um Vorwärtskinematik eines Manipulators zu beschreiben, kann der Nullraum beschrieben werden durch:

$$\mathcal{N}^* = \left\{ q \mid \left\| \Psi \cdot \left( \Phi(q) - x_{TCP} \right) \right\| < \varepsilon \right\}$$

**[0056]** Mit einem beliebig kleinen  $\varepsilon$ .

**[0057]** Ein Satz A umfasst alle zulässigen Konfigurationen der Verbindungen. Dies berücksichtigt einen ausreichenden Abstand zu Winkelgrenzen von Verbindungen und Singularitäten. Das heißt:

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_{\text{jointlimits}} \cap \mathcal{A}_{\text{singularities'}}$$

$$\mathcal{A}_{\text{jointlimits}} = \left\{ q \mid q_i \in [q_{i,\text{min}} + \zeta_1, q_{i,\text{max}} - \zeta_1], \forall i = 1, \dots, N \right\}$$

$$\mathcal{A}_{\text{singularities}} = \left\{ q \mid \sigma_{\text{min}}(J(q)) > \zeta_2 \right\}.$$

**[0058]** Je größer der Wert von  $\zeta_1$  ist, desto mehr Abstand muss zu Grenzen von Verbindungen eingehalten werden. In einfacher Weise vergrößert ein größerer Wert von  $\zeta_2$  den Abstand zu Singularitäten.

**[0059]** Das Lösen des Optimierungsproblems gemäß Gleichung (1) ist aufgrund dessen Nichtkonvexität im Allgemeinen nicht trivial.

**[0060]** Bei eindimensionalen Nullräumen, beispielsweise bei einem Manipulator mit sieben Freiheitsgraden und  $\Psi=I_6$ , wird ein einfaches diskretisiertes Nullraumtraversal (Linienuche) verwendet werden können.

**[0061]** Bei höherdimensionalen Nullräumen kann eine suboptimale Lösung gefunden werden, indem beispielsweise sogenannte Bergsteigeralgorithmen verwendet werden.

**[0062]** Beide Lösungsansätze erfordern eine anfängliche Konfiguration der Verbindungen  $q_{\text{init}}$ , welche die Beschränkungen der TCP-Stellungen berücksichtigt. Solch eine Konfiguration kann jede Lösung der inversen Kinematik sein.

**[0063]** Es sei hier angemerkt, dass die Optimierung offline gelöst wird, um eine neue Zielanordnung der Verbindungen aufzufinden. Es ist keine Optimierung notwendig, die online durchgeführt wird.

**[0064]** Alternativ kann das folgende Problem gelöst werden:

$$\text{minimize} \max_{q \in \{\mathcal{N}^* \cap \mathcal{A}\}} \lambda_i \cdot \frac{|J_i(q)^T f_{\text{ext}} + G_i(q)|}{\tau_{\text{max},1}} \quad (2)$$

**[0065]** Hierbei ist  $\tau_{\text{max},i}$  das maximale Drehmoment, welches eine Verbindung erzeugen kann, und  $J_i^T$  und  $G_i$  sind Zeilenvektoren, die mit individuellen Verbindungen korrespondieren.

**[0066]** Die Parameter  $\lambda_i$  sind die diagonalen Elemente von  $\Lambda$ , wie mit Bezug zu Gleichung (1) eingeführt. Daher ist die Gleichung (2) darauf ausgerichtet, die Belastung einer Verbindung im jeweils schlechtesten Fall zu minimieren.

**[0067]** Die **Fig. 1** bis **Fig. 6** zeigen einen Manipulator **1**, nämlich einen Roboterarm mit Gelenkverbindungen.

**[0068]** Mit Bezug zu den **Fig. 1** bis **Fig. 6** umfasst ein Verfahren zur Minimierung der Belastung mindestens einer Verbindung **3** des Manipulators **1**, der mittels eines Werkzeugs **2** auf ein Arbeitsobjekt oder seine Umgebung eine Kraft und/ oder ein Drehmoment ausübt, die nachfolgenden Schritte:

- Festlegen des Betrags und/ oder der Richtung der Maximalkraft und/ oder des Maximaldrehmoments, mit welcher bzw. mit welchem die Verbindung **3** maximal belastet werden soll,
- Vorgeben des Betrags und/ oder der Richtung der erwarteten Kraft und/ oder des erwarteten Drehmoments, welche bzw. welches das Werkzeug **2** ausüben soll und/ oder auf dieses einwirkt,
- Vorgeben mindestens einer räumlichen Orientierung und/ oder räumlichen Position des Werkzeugs **2**, die während des Ausübens oder Einwirkens der Kraft und/ oder des Drehmoments zugelassen werden soll, und
- Ermitteln einer räumlichen Orientierung und räumlichen Position der Verbindung **3**, welche diese einnimmt, wenn das Werkzeug **2** die Kraft und/ oder das Drehmoment ausübt und/ oder erfährt.

**[0069]** Die Schritte werden ausgeführt, um die räumlichen Orientierungen und räumlichen Positionen von mehreren Verbindungen **3** relativ zueinander zu ermitteln. Es werden mehrere räumliche Orientierungen und räumliche Positionen des Werkzeugs **2** vorgegeben, die während des Ausübens und/ oder Einwirkens der Kraft und/ oder des Drehmoments zugelassen werden sollen.

**[0070]** Die Schritte werden „offline“, nämlich an einer Vorrichtung ausgeführt, die vom Manipulator **1** unabhängig betrieben wird.

- [0071]** Beim Ermitteln der räumlichen Orientierung und räumlichen Position der Verbindung 3 werden geometrische oder räumliche Beschränkungen berücksichtigt.
- [0072]** Als Verbindung 3 wird eine Gelenkverbindung verwendet. Als Manipulator 1 wird ein Roboterarm mit mehreren Verbindungen 3 verwendet, wobei die Verbindungen 3 als Gelenkverbindungen ausgestaltet sind, an denen Segmente des Roboterarms relativ zueinander beweglich angebunden sind. Mindestens eine Verbindung 3 wird aus mehreren Verbindungen ausgewählt, deren Belastung minimiert werden soll.
- [0073]** Mindestens eine Verbindung 3 aus mehreren Verbindungen wird besonders gewichtet, wenn das Ermitteln der räumlichen Orientierung und räumlichen Position der Verbindung 3 durchgeführt wird.
- [0074]** Der Manipulator 1 umfasst mindestens eine bewegliche Verbindung 3 und ein Werkzeug 2, wobei die räumliche Anordnung der Verbindung 3 durch das hier beschriebene Verfahren ermittelt bzw. bestimmt ist.
- [0075]** Beispielhaft werden nachfolgend Konfigurationen, nämlich räumliche Anordnungen von Verbindungen 3, beschrieben, die in den **Fig. 1** bis **Fig. 6** dargestellt sind.
- [0076]** In **Fig. 1** ist eine anfängliche Konfiguration gezeigt, in **Fig. 2** die schlechteste Konfiguration und in **Fig. 3** die beste Konfiguration eines Manipulators 1, nämlich eines Roboterarms.
- [0077]** **Fig. 2** zeigt die Minimierung der Belastung einer Verbindung 3, nämlich einer Gelenkverbindung, bei voll festgelegter TCP-Stellung. Der mittige offene Pfeil zeigt die Richtung der erwarteten kartesischen Verschiebung.
- [0078]** In diesem Beispiel muss der Manipulator 1, nämlich der Roboterarm, entlang der x-Achse seines Basiskoordinatensystems mit dem Werkzeug 2 eine Kraft ausüben, beispielsweise um ein Antippen oder Anstechen auszuführen.
- [0079]** Die TCP-Stellung  $x_{TCP}$  ist vorgegeben und alle kartesischen Richtungen sind festgelegt. Das heißt  $\Psi = I_6$ .
- [0080]** Die erwartete kartesische Verschiebung ist ausschließlich entlang der x-Achse des Basiskoordinatensystems ausgerichtet.
- [0081]** Das heißt:  $f_{ext} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$
- [0082]** Das Ziel ist es nun, das quadratische Mittel der Belastung der Verbindung 3 zu minimieren. Daher gilt:
- $$\Lambda = \text{diag}(0,0,0,1,1,0)$$
- [0083]** Die anfängliche Konfiguration ist in **Fig. 1** gezeigt. Das quadratische Mittel der Belastung der Verbindung 3 bei dieser Konfiguration bei einer gegebenen externen Belastung ist  $\tau_{RMS}=0,2926$  Newtonmeter.
- [0084]** Die schlechteste Konfiguration im Hinblick auf das quadratische Mittel der Belastung der Verbindung 3 für die gegebene externe Belastung ist in **Fig. 2** gezeigt.
- [0085]** Dort gilt:  $\tau_{RMS}=0,2988$  Newtonmeter.
- [0086]** **Fig. 3** zeigt die bestmögliche Konfiguration.
- [0087]** Dort gilt:  $\tau_{RMS}=0,0787$  Newtonmeter.
- [0088]** Bemerkenswerterweise wirkt die schlechteste Konfiguration gemäß **Fig. 2** intuitiv und menschlich, kommt aber in Bezug auf eine Gelenkbelastung bei gegebener externer Verschiebung dem schlechtesten Fall sehr nahe.
- [0089]** Die optimierte Konfiguration erlaubt das Reduzieren des quadratischen Mittels der Belastung der Verbindung 3 im Wesentlichen um 73%.



- [0090] Es sei angemerkt, dass dargestellte Abweichungen in der TCP-Stellung aufgrund unpräziser Kalibrierung gegeben sein können und diese schematisch eine Testanordnung beschreiben sollen.
- [0091] Im Rahmen einer Erweiterung werden die Dimensionen des Nullraums auf zwei Wegen vergrößert. Beim ersten Weg ist eine Rotation um die x-Achse des Basiskoordinatensystems nicht länger ausgeschlossen. Bei Andrück-, Antipp- oder Anstech- oder Anschneideaufgaben ist dies vernünftig, da die Orientierung im Hinblick auf die x-Achse willkürlich ist.
- [0092] Wenn  $\Psi = \text{diag}(1,1,1,0,1,1)$ , ist die neue optimierte Konfiguration in **Fig. 5** gezeigt.
- [0093] Das resultierende quadratische Mittel der Belastung der Verbindung **3** ist nur  $\tau_{\text{RMS}}=0,0092$  Newtonmeter, d.h. die Belastung der Verbindung **3** ist verglichen mit dessen Belastung bei der anfänglichen Konfiguration um 96,86 % reduziert worden.
- [0094] In **Fig. 6** ist eine weitere optimierte Konfiguration bei einer festgelegten TCP-Stellung gezeigt, bei der eine willkürliche Translation entlang der y- und z-Achse möglich ist.
- [0095] Es gilt:  $\Psi = \text{diag}(1,0,0,1,1,1)$
- [0096] Das resultierende quadratische Mittel der Belastung der Verbindung **3** beträgt  $\tau_{\text{RMS}}=0,1050$  Newtonmeter. Dies stellt wieder eine wesentliche Reduzierung verglichen mit dem Wert bei der anfänglichen Konfiguration dar, nämlich eine Reduzierung um 96,40%.
- [0097] **Fig. 4** zeigt insoweit die anfängliche Konfiguration, in **Fig. 5** ist eine beste Konfiguration gezeigt, wobei eine Rotation um die x-Achse ermöglicht ist, und in **Fig. 6** ist die beste Konfiguration gezeigt, wobei eine Translation entlang der y- und z-Achse ermöglicht ist. Die **Fig. 4** bis **Fig. 6** zeigen eine Minimierung der Gelenkbelastung bei teilweise fixierter TCP-Stellung. Der offene Pfeil zeigt die Richtung der erwarteten kartesischen Verschiebung an.
- [0098] Das hier beschriebene Verfahren könnte in einer Rapid-Befehlskette der folgenden Art eingebracht werden:
- [0099] Dies heißt in deutscher Sprache: Berechne beste Konfiguration (TCP-Stellung, fixierte Richtungen, kartesische Belastung, Wichtung von Gelenken).
- [0100] Anstelle des Spezifizierens der Beschränkungen der TCP-Stellungen, entweder durch eine Fixierung der Richtungen oder durch Zulassen, dass diese während der Optimierung modifiziert werden, könnte eine weitere Beschränkung gelten. Diese Beschränkung könnte Grenzen für das Maß der Änderung einer individuellen Richtung festlegen.
- [0101] Beispielsweise könnte eine Änderung der TCP-Stellung mit Bezug zur z-Achse des Werkzeugs **2** auf plus/ minus 25 % beschränkt werden, anstatt diese entweder vollständig festzulegen oder vollständig fließen zu lassen.
- [0102] Eine weitere zusätzliche Beschränkung könnte durch eine Limitierung des Armwinkels erfolgen, um eine steife Konfiguration, wie die optimierte gemäß **Fig. 3** zu vermeiden.
- [0103] Die Annäherung könnte auch in Richtung einer iterativen Online-Optimierung erweitert werden.
- [0104] Das beschriebene Verfahren gemäß der Erfindung kann bei verschiedenen Manipulator Typen mit unterschiedlichen Arten von Gelenkverbindungen angewendet werden.
- [0105] Das Verfahren ist oben am Beispiel eines in **Fig. 1** schematisch und beispielhaft dargestellten Manipulators **1** erläutert worden, der nur Drehgelenke **3** hat.
- [0106] Ebenso lässt sich das Verfahren anwenden bei einem in der **Fig. 7** schematisch und beispielhaft dargestellten Manipulator **1a**, der nur prismatische, also Verschiebegelenke **3a**, **3a'** hat, anwenden.
- [0107] Weiterhin ebenso lässt sich das Verfahren bei einem in der **Fig. 8** schematisch und beispielhaft gezeigten Manipulator **1b** anwenden, der sowohl Drehgelenke **3b** als auch prismatische Gelenke **3b'** hat.

## Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Manipulator
<b>1a</b>	Manipulator
<b>1b</b>	Manipulator
<b>2</b>	Werkzeug
<b>3</b>	Drehgelenk
<b>3a</b>	Prismatisches Gelenk
<b>3a'</b>	Prismatisches Gelenk
<b>3b</b>	Drehgelenk
<b>3b'</b>	Prismatisches Gelenk

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Minimierung der Belastung mindestens einer Verbindung (3) eines Manipulators (1), der mittels eines Werkzeugs (2) auf ein Arbeitsobjekt oder seine Umgebung eine Kraft und/ oder ein Drehmoment ausüben soll, **dadurch gekennzeichnet**, dass die nachfolgenden Schritte ausgeführt werden:

- Festlegen des Betrags und/ oder der Richtung der Maximalkraft und/ oder des Maximaldrehmoments, mit welcher bzw. mit welchem die mindestens eine Gelenkverbindung maximal belastet werden soll,
- Vorgeben des Betrags und/ oder der Richtung der erwarteten Kraft und/ oder des erwarteten Drehmoments, welche bzw. welches das Werkzeug ausüben soll und/ oder auf dieses einwirkt,
- Vorgeben mindestens einer ersten räumlichen Orientierung und/ oder räumlichen Position des Werkzeugs, die sich während des Ausübens oder Einwirkens der Kraft und/ oder des Drehmoments nicht ändern soll, und
- Ermitteln einer Konfiguration der Gelenkverbindung, welche diese einnimmt, wenn das Werkzeug unter Einhaltung der vorgegebenen ersten räumlichen Orientierung und/ oder räumlichen Position die vorgegebene Kraft und/ oder das vorgegebene Drehmoment ausübt und/ oder erfährt derart, dass der festgelegte Betrag und/ oder die festgelegte Richtung der Maximalkraft und/ oder des Maximaldrehmoments, mit welcher bzw. mit welchem die mindestens eine Gelenkverbindung maximal belastet werden soll, nicht überschritten wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schritte ausgeführt werden, um die räumlichen Orientierungen und räumlichen Positionen von mehreren Verbindungen (3) relativ zueinander zu ermitteln.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere räumliche Orientierungen und/ oder räumliche Positionen des Werkzeugs (2) vorgegeben werden, die während des Ausübens und/ oder Einwirkens der Kraft und/ oder des Drehmoments zugelassen werden sollen.

4. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schritte an einer Vorrichtung ausgeführt werden, die vom Manipulator (1) unabhängig betreibbar ist.

5. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, dass beim Ermitteln der räumlichen Orientierung und räumlichen Position der Verbindung (3) geometrische oder räumliche Beschränkungen berücksichtigt werden.

6. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Verbindung (3) eine Gelenkverbindung verwendet wird.

7. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Manipulator (1) ein Roboterarm mit mehreren Verbindungen (3) verwendet wird, wobei die Verbindungen (3) als Gelenkverbindungen ausgestaltet sind, an denen Segmente des Roboterarms relativ zueinander beweglich angebunden sind.

8. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine Verbindung (3) aus mehreren Verbindungen ausgewählt wird, deren Belastung minimiert werden soll.

9. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine Verbindung (3) aus mehreren Verbindungen besonders gewichtet wird, wenn das Ermitteln der räumlichen Orientierung und räumlichen Position der Verbindung (3) durchgeführt wird.

10. Manipulator (1), umfassend mindestens eine bewegliche Verbindung (3) und ein Werkzeug (2), wobei die räumliche Anordnung der Verbindung (3) durch das Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche ermittelt bzw. bestimmt ist.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

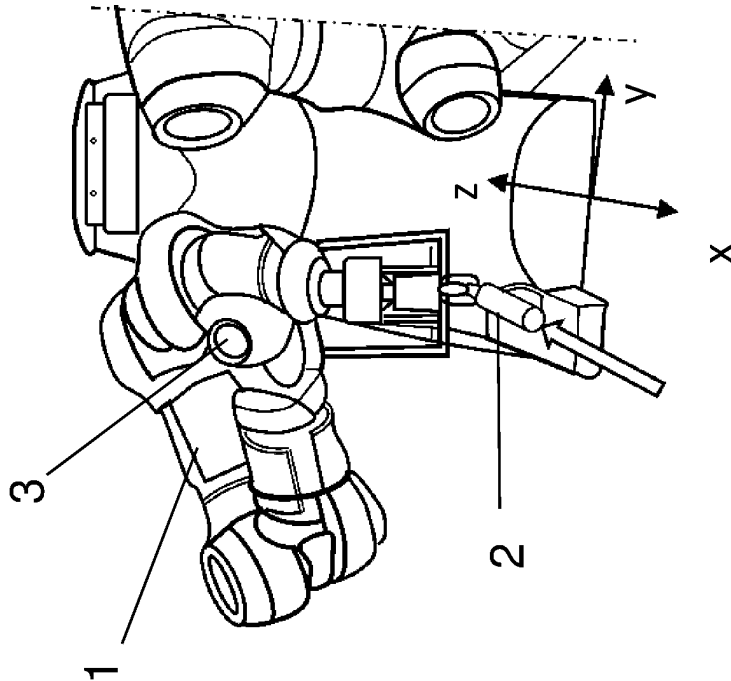
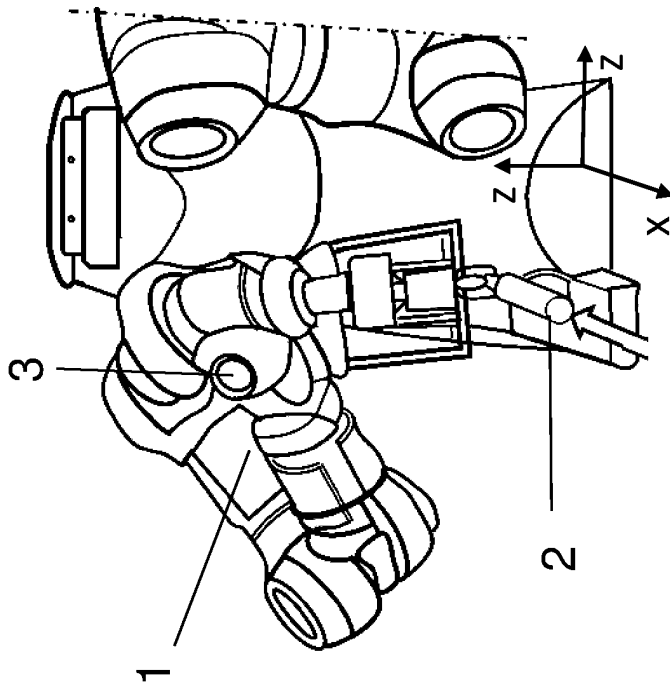
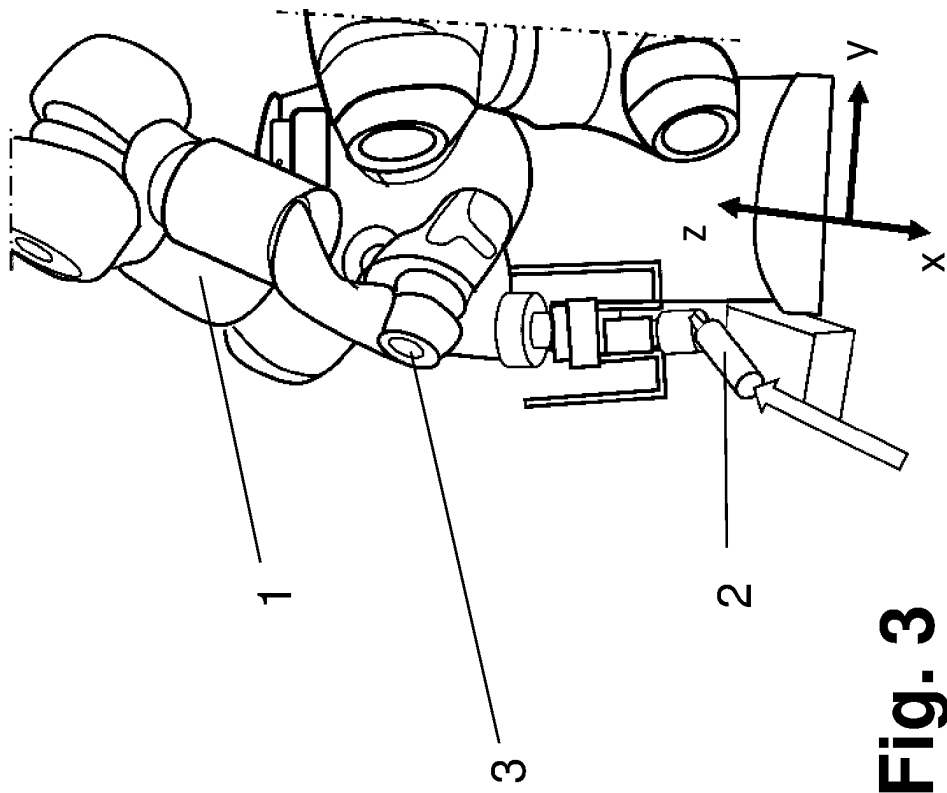


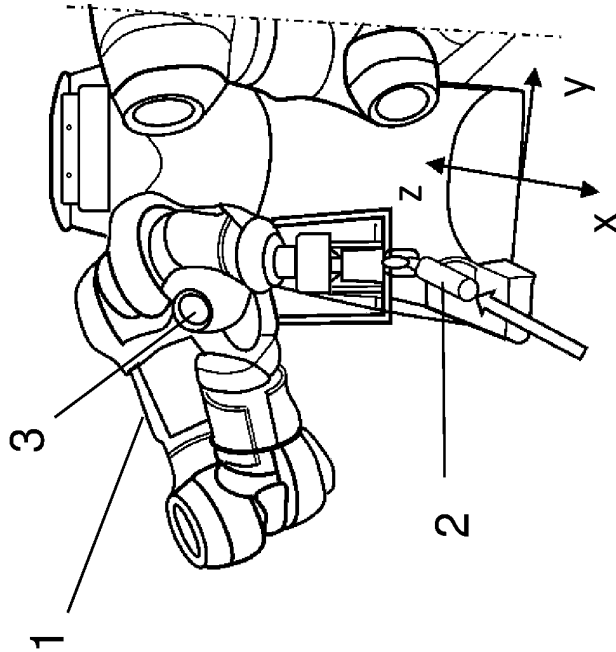
Fig. 1



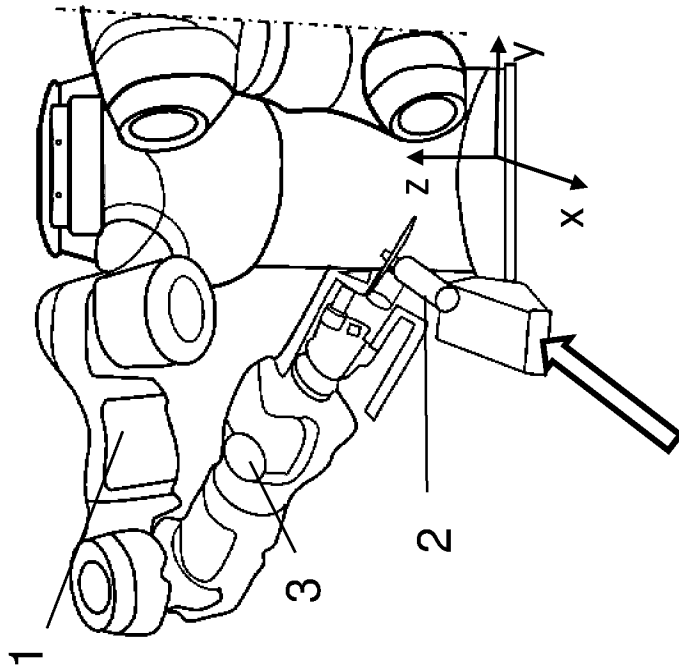
**Fig. 2**



**Fig. 3**

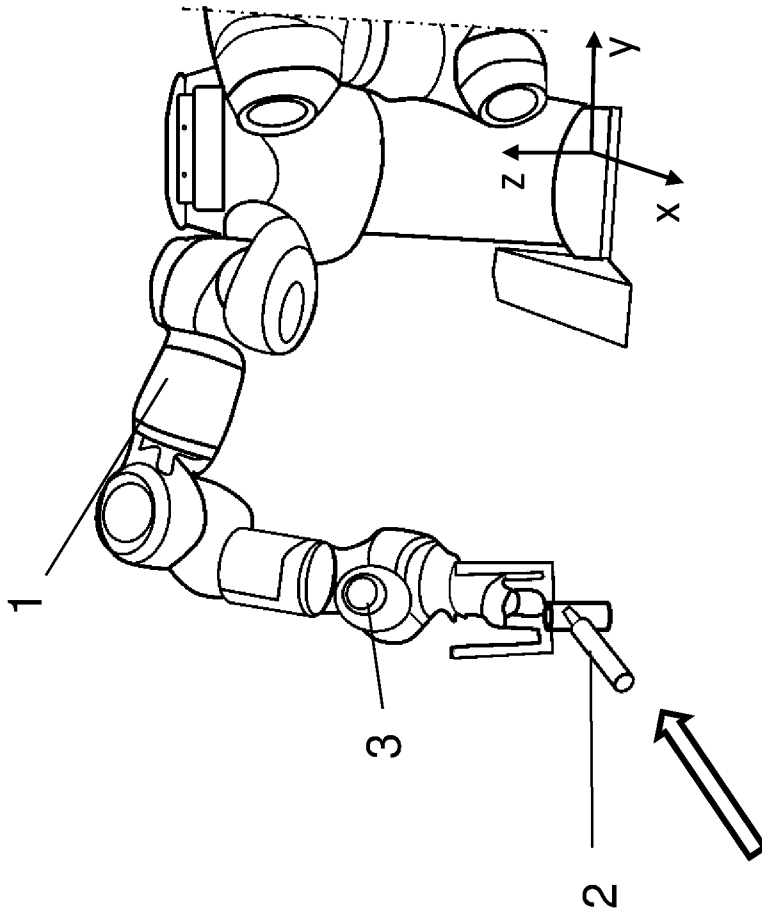


**Fig. 4**



**Fig. 5**





**Fig. 6**

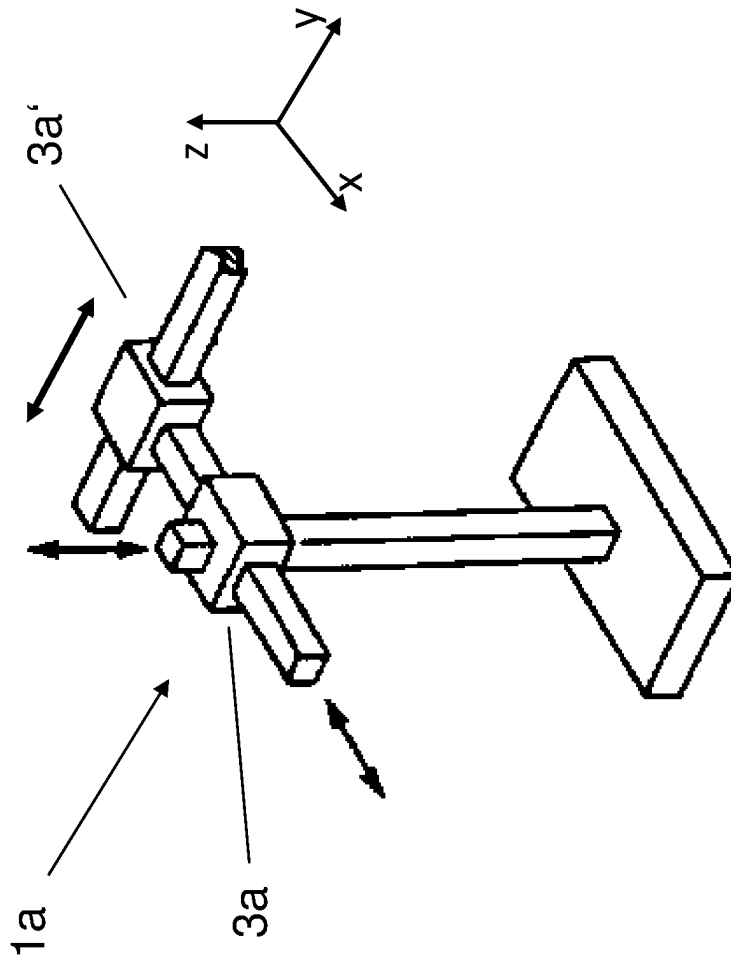


Fig. 7

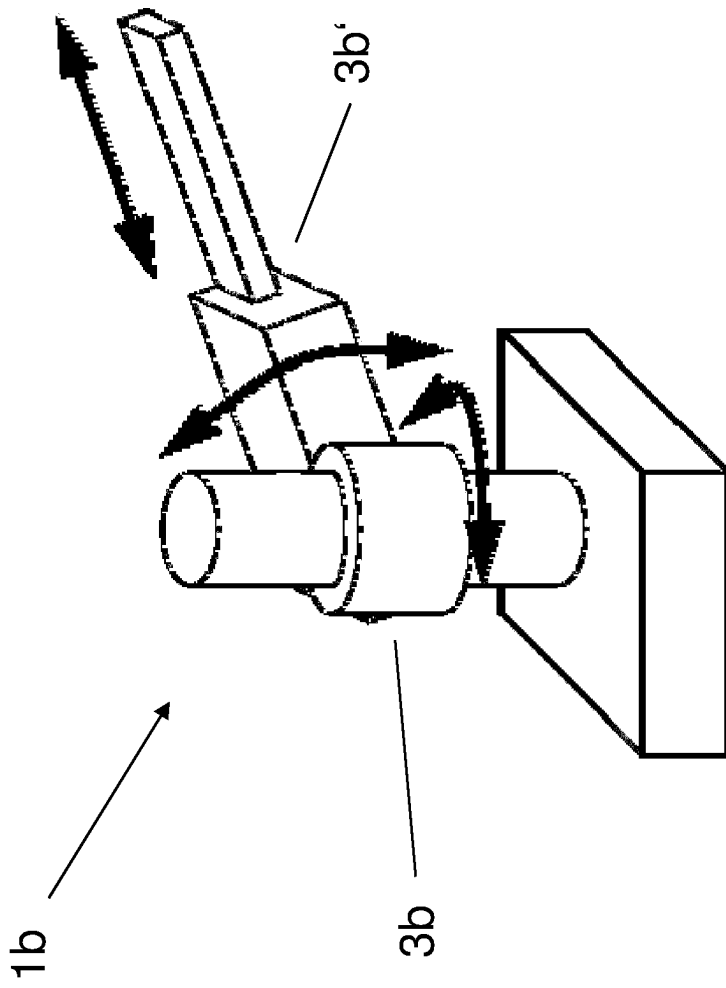


Fig. 8